

# **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

## **SEDE QUITO**

### **CARRERA:**

**INGENIERÍA MECÁNICA**

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIEROS MECÁNICOS

### **TEMA:**

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN EN PROBETAS DE ALUMINIO CON VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE AA 7075-T6 RECICLADO OBTENIDAS MEDIANTE FUNDICIÓN EN DIRECCIÓN PARALELA Y PERPENDICULAR AL MOLDE DE ARENA.

### **AUTORES:**

MIGUEL ANGEL CAIZA CHILUISA  
ALEX DANIEL MAYORGA AYORA

### **TUTOR:**

WILLIAM GUSTAVO DÍAZ DÁVILA

**Quito, 23 de septiembre del 2020**

Fecha: Quito, 23 de septiembre de 2020

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Nosotros, Alex Daniel Mayorga Ayora, con documento de identificación N° 1722881560, y Miguel Ángel Caiza Chiluisa con documento de identificación N° 1714305800, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN EN PROBETAS DE ALUMINIO CON VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE AA 7075-T6 RECICLADO OBTENIDAS MEDIANTE FUNDICIÓN EN DIRECCIÓN PARALELA Y PERPENDICULAR AL MOLDE DE ARENA.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Alex Daniel Mayorga Ayora

1722881560



Miguel Ángel Caiza Chiluisa

1714305800

Fecha: Quito, 23 de septiembre de 2020

**DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE  
TUTOR**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A TRACCIÓN EN PROBETAS DE ALUMINIO CON VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE AA 7075-T6 RECICLADO OBTENIDAS MEDIANTE FUNDICIÓN EN DIRECCIÓN PARALELA Y PERPENDICULAR AL MOLDE DE ARENA” realizado por los

estudiantes Alex Daniel Mayorga Ayora y Miguel Angel Caiza Chiluisa, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.



-----  
Ing. William Gustavo Díaz  
Dávila C.I.: 0400926184

## **DEDICATORIA**

### **Miguel Ángel Caiza Chiluisa.**

Esta tesis está dedicada a mi familia especialmente a mis padres Ángel Caiza y María Luisa quienes me apoyaron durante todo mi proceso académico. A mi esposa Paulina e hijos por el apoyo incondicional durante todo el proceso, por estar conmigo hasta llegar a este gran momento, que es la culminación de un proyecto de vida que inicia nuevas metas en pro del futuro de mi familia.

### **Alex Daniel Mayorga Ayora.**

Esta tesis se la dedico a mis padres Alex Mayorga León y Blanca Ayora Ordoñez los cuales me apoyaron económica y moralmente en el proceso de culminación de mis estudios y gracias a su gran ejemplo he llegado a ver la vida y el mundo de diferente manera para así llegar a ser una mejor persona y profesional.

## **AGRADECIMIENTO**

### **Miguel Ángel Caiza Chiluisa.**

Quiero expresar mi inmensa gratitud primero a Dios por darme salud, vida, trabajo, sabiduría y persistencia para llegar a donde he llegado, me van a faltar páginas para agradecer a las personas que se han involucrado directa o indirectamente como hermanos, sobrinos y otros en la realización de este trabajo, sin embargo, merecen mi reconocimiento y agradecimiento especial a mi madre María Luisa, mi padre Ángel Caiza y mi suegra Consuelo Farinango, que con sus consejos y apoyo me ayudaron a culminar mi carrera universitaria, a mi esposa Paulina por la paciencia, tolerancia ,compromiso, junto con mis hijos y me dieron el valor suficiente para no decaer cuando todo era complicado y parecía imposible de lograr mi meta.

### **Alex Daniel Mayorga Ayora.**

Agradezco primero a Dios, mis padres y a mi abuela Gloria Ordoñez por darme fuerza para seguir adelante en toda mi carrera y gracias a todas sus enseñanzas he llegado a culminar esta etapa de mi camino profesional y llegar a tener mayores aspiraciones en mi vida tanto personal como profesional.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	14
ABSTRACT .....	15
INTRODUCCIÓN .....	16
CAPÍTULO I.....	17
1. MARCO TEÓRICO.....	17
1.1. Aluminio .....	17
1.2. Aluminio y sus aleaciones.....	17
1.2.1. Aleaciones maleables o de forja.....	18
1.2.2. Aleaciones de fundición.....	19
1.3. Aleación de aluminio Al-Zn-Mg (serie 7 XXX).....	20
1.4. Propiedades mecánicas.....	21
1.5. Ensayo a Tracción.....	21
1.5.1. Diagrama Esfuerzo [MPa] – Deformación unitaria [mm/mm].....	22
1.5.2. Norma ASTM E8.....	23
1.6. Dirección de fundición para ensayos .....	25
1.6.1. Dirección perpendicular .....	25
1.6.2. Dirección paralela .....	26
1.7. Fundición.....	27
1.7.1. Procesos de fundición .....	27
1.7.2. Fundición en molde de arena .....	29
1.7.3. Solidificación y enfriamiento.....	31
CAPÍTULO II.....	32
2. MODELO EXPERIMENTAL.....	32
2.1 Metodología de trabajo .....	32
2.1.1. Etapa1: Verificación y mantenimiento de equipos .....	34

2.1.2.	Elaboración de lingotes de aluminio .....	36
2.1.3.	Preparación de los moldes de fundición.....	37
2.1.4.	Fundición del aluminio y AA 7075 – T6 .....	39
2.1.5.	Extracción y Maquinado de probetas para ensayos .....	40
2.2.	Ensayo a tracción .....	45
2.2.1.	Metodología para protocolo de pruebas de ensayos a Tracción .....	47
2.2.2.	Ingreso y toma de datos.....	48
2.2.3.	Material Base .....	49
2.2.3.	Análisis probabilístico.....	53
2.2.4.	Ductilidad del material.....	59
CAPÍTULO III .....		65
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	65
3.1.	Análisis de resultados obtenidos en ensayos a tracción.....	65
3.2.	Análisis del material base.....	65
3.2.1.	Material base al 0% de AA7075 en paralelo.....	65
3.2.2.	Material base al 0% de AA7075 en perpendicular.....	67
3.3.	Análisis del material al 10% de AA7075 reciclado. ....	68
3.3.1.	Material con 10% de AA7075 en paralelo.....	68
3.3.2.	Material con 10% de AA7075 en perpendicular.....	69
3.4.	Análisis del material al 20% de AA7075 reciclado. ....	71
3.4.1.	Material con 20% de AA7075 en paralelo.....	71
3.4.2.	Material con 20% de AA7075 en perpendicular.....	72
3.5.	Análisis del material al 30% de AA7075 reciclado. ....	74
3.5.1.	Material con 30% de AA7075 en paralelo.....	74
3.5.2.	Material con 30% de AA7075 en perpendicular.....	75
3.6.	Comparación de las propiedades mecánicas en paralelo y perpendicular .....	77
3.6.1.	Comparación del material base al 0% de AA7075 .....	77
3.6.2.	Comparación del material al 10% de AA7075 .....	78
3.6.3.	Comparación del material al 20% de AA7075 .....	79

3.6.4.	Comparación del material al 30% de AA7075 .....	80
3.7.	Comparación de las propiedades mecánicas en todo porcentaje y dirección....	81
3.7.1.	Comparación de esfuerzo máximo y deformación unitaria máxima. ....	81
3.7.2.	Comparación de límite de fluencia y deformación máxima. ....	82
4.	CAPÍTULO IV .....	84
4.-	Costo .....	84
	RECOMENDACIONES .....	89
	BIBLIOGRAFÍA .....	90



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química de aleaciones de la serie 7XXX. Porcentaje en peso. ....	19
Tabla 2. Propiedades mecánicas a tracción de diferentes aleaciones de aluminio para forja tratables térmicamente, en distintos estados de tratamiento.....	21
Tabla 3. Peso del aluminio dulce y de reciclado para utilizar en los ensayos.....	26
Tabla 4. Análisis entre los diferentes tipos de fundición. ....	28
Tabla 5. Etapas de la metodología de trabajo .....	32
Tabla 6. Parámetros de en el torneado del aluminio .....	43
Tabla 7. Esfuerzo último y módulo de elasticidad en probetas fundidas paralelas al molde de arena. ....	49
Tabla 8. Esfuerzo último y módulo de elasticidad en probetas fundidas perpendicular al molde de arena .....	49
Tabla 9. Esfuerzo último y módulo de elasticidad en probetas fundidas paralela al molde de arena con sus respectivos porcentajes de material reciclado.....	51
Tabla 10. Esfuerzo último y módulo de elasticidad en probetas fundidas perpendicular al molde de arena con sus respectivos porcentajes de material reciclado.....	52
Tabla 11. Análisis estadístico al 0% paralelo y perpendicular.....	54
Tabla 12. Análisis estadístico al 10% paralelo y perpendicular.....	54
Tabla 13. Análisis estadístico al 20% paralelo y perpendicular.....	55
Tabla 14. Análisis estadístico al 30% paralelo y perpendicular.....	55
Tabla 15. Análisis de esfuerzo de sigma, rango y porcentaje en paralelo al 0%. ....	57
Tabla 16. Análisis de esfuerzo de sigma, rango y porcentaje en paralelo al 10%. ....	57
Tabla 17. Análisis de esfuerzo de sigma, rango y porcentaje en paralelo al 20%. ....	57
Tabla 18. Análisis de esfuerzo de sigma, rango y porcentaje en paralelo al 30%. ....	58
Tabla 19. Valores obtenidos del programa para el material base a 0% de AA7075 en paralelo.....	59
Tabla 20. Valores obtenidos del programa para el material base a 0% de AA7075 en perpendicular.....	60
Tabla 21. Valores obtenidos del programa con 10% reciclado del material de AA7075 en paralelo.....	61

Tabla 22. Valores obtenidos del programa con 10% reciclado del material de AA7075 en perpendicular.....	61
Tabla 23. Valores obtenidos del programa con 20% reciclado del material de AA7075 en paralelo.....	62
Tabla 24.. Valores obtenidos del programa con 20% reciclado del material de AA7075 en perpendicular.....	63
Tabla 25. Valores obtenidos del programa con 30% reciclado del material de AA7075 en paralelo.....	63
Tabla 26. Valores obtenidos del programa con 30% reciclado del material de AA7075 en perpendicular.....	64
Tabla 27. Esfuerzos y deformaciones al 0 % paralelo .....	66
Tabla 28. Propiedades mecánicas del material base en Paralelo y 0% de reciclado.....	67
Tabla 29. Esfuerzos y deformaciones al 0 % perpendicular .....	67
Tabla 30. Propiedades mecánicas del material base en Perpendicular y 0% de reciclado.....	68
Tabla 31. Esfuerzos y deformaciones al 10 % paralela .....	68
Tabla 32. Propiedades mecánicas del material en paralelo y 10% de reciclado.....	69
Tabla 33.. Esfuerzos y deformaciones al 10 % perpendicular .....	70
Tabla 34. Propiedades mecánicas del material en perpendicular y 10% de reciclado.....	71
Tabla 35. Esfuerzos y deformaciones al 20 % paralelo.....	71
Tabla 36. Propiedades mecánicas del material en paralelo y 20% de reciclado.....	72
Tabla 37.Esfuerzos y deformaciones al 20 % perpendicular .....	73
Tabla 38. Propiedades mecánicas del material en perpendicular y 20% de reciclado.....	74
Tabla 39. Esfuerzos y deformaciones al 0 % perpendicular .....	74
Tabla 40. Propiedades mecánicas del material en paralelo y 30% de reciclado.....	75
Tabla 41. Esfuerzos y deformaciones al 30 % perpendicular .....	76
Tabla 42. Propiedades mecánicas del material en perpendicular y 30% de reciclado.....	77
Tabla 43. Porcentaje de diferencia entre el mejor resultado y el de menor valor.....	78
Tabla 44. Porcentaje de diferencia entre el mejor resultado y el de menor valor.....	79
Tabla 45. Porcentaje de diferencia entre el mejor resultado y el de menor valor.....	80
Tabla 46. Porcentaje de diferencia entre el mejor resultado y el de menor valor.....	80

Tabla 47. Porcentaje de diferencia total entre el máximo esfuerzo y el de menor valor.	82
Tabla 48. Porcentaje de diferencia total entre la deformación máxima y la de menor valor.....	82
Tabla 49. Porcentaje de diferencia total entre el límite de fluencia y el de menor valor.....	83
Tabla 50. Costos por producción de probetas de aluminio 7075-T6 reciclado.....	85
Tabla 51. Costo por maquinado de probeta de aluminio 7075-T6 reciclado. ....	85
Tabla 52. Costo del proceso de reciclado material aluminio 7075-T6 .....	86
Tabla 53. Costos de material en general .....	86
Tabla 54. Costos de ahorro porcentual.....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama de fase aluminio - zinc .....	20
<b>Figura 2.</b> Diagrama esfuerzo vs deformación unitaria del aluminio dulce. ....	22
<b>Figura 3.</b> Norma ASTM E 8 detalla las dimensiones de las probetas para su ensayo. ...	23
<b>Figura 4.</b> Diseño y dimensiones de la probeta según norma ASTM E8 .....	24
<b>Figura 5.</b> Certificado de calibración extensómetro axial .....	25
<b>Figura 6.</b> Dirección de fundición perpendicular .....	26
<b>Figura 7.</b> Dirección de fundición paralela.....	26
<b>Figura 8.</b> Diagrama de los procesos de fundición de metales.....	28
<b>Figura 9.</b> Proceso de fundición en arena. Autores .....	29
<b>Figura 10.</b> Esquema de un molde de arena mostrando diferentes características, Pearson.....	31
<b>Figura 11.</b> Lingotes de aluminio, Autores. ....	33
<b>Figura 12.</b> Reciclaje de Aluminio AA 7075-T6, Autores.....	34
<b>Figura 13.</b> Lingotes de aluminio, Autores .....	36
<b>Figura 14.</b> Reciclaje de AA 7075-T6, Autores .....	37
<b>Figura 15.</b> Tamizado de arena, Autores. ....	38
<b>Figura 16.</b> Moldes gasificables, Autores.....	38
<b>Figura 17.</b> Caja de moldeo, Autores .....	38
<b>Figura 18.</b> Horno encendido, Autores.....	39
<b>Figura 19.</b> Colado del material, Autores .....	40
<b>Figura 20.</b> Obtención de material, Autores .....	40
<b>Figura 21.</b> Maquinado de probetas, Autores.....	41
<b>Figura 22.</b> Geometría del Inserto DCMT 11T304, Marca Arno.....	42
<b>Figura 23.</b> Valores de velocidad de corte ( $V_c$ ), Cnc emcomate-200.....	43
<b>Figura 24.</b> Parámetros de mecanizado en el torno CNC EMCOMAT E-200.....	44
<b>Figura 25.</b> Probeta según Norma ASTM, Autores.....	45
<b>Figura 26.</b> Máquina Universal Test Resource, Autores.....	46
<b>Figura 27.</b> Sujeción con mordazas, Autores. ....	46
<b>Figura 28.</b> Rotura de Probeta, Autores.....	47
<b>Figura 29.</b> Ingreso de datos según norma ASTM, Autores.....	48

<b>Figura 30.</b> Ingreso de datos de la probeta, Autores.....	48
<b>Figura 31.</b> Colocar el sensor Axial, Autores.....	48
<b>Figura 32.</b> Gráfica de resistencia a fluencia.....	50
<b>Figura 33.</b> Paralelo al molde de arena, Autores .....	51
<b>Figura 34.</b> Perpendicular al molde de arena, Autores.....	51
<b>Figura 35.</b> Diagrama esfuerzo vs deformación del material base en paralelo. ....	66
<b>Figura 36.</b> Diagrama esfuerzo vs deformación del material base en perpendicular .....	67
<b>Figura 37.</b> Diagrama esfuerzo vs deformación del material al 10% en paralelo .....	68
<b>Figura 38.</b> Diagrama esfuerzo vs deformación del material al 10% en perpendicular ...	70
<b>Figura 39.</b> Diagrama esfuerzo vs deformación del material al 20% en paralelo .....	71
<b>Figura 40.</b> Diagrama esfuerzo vs deformación del material al 20% en perpendicular ...	73
<b>Figura 41.</b> Diagrama esfuerzo vs deformación del material al 30% en paralela .....	74
<b>Figura 42.</b> Diagrama esfuerzo vs deformación del material al 30% en perpendicular ...	76
<b>Figura 43.</b> Comparación entre paralela y perpendicular del material base al 0%.....	77
<b>Figura 44.</b> Comparación entre paralela y perpendicular del material al 10% de AA7075.....	79
<b>Figura 45.</b> Comparación entre paralela y perpendicular del material al 20% de AA7075.....	79
<b>Figura 46.</b> Comparación entre paralela y perpendicular del material al 30% de AA7075.....	80
<b>Figura 47.</b> Comparación de esfuerzo vs deformación máxima de las distintas fundiciones.....	81
<b>Figura 48.</b> Comparación del límite de fluencia vs deformación máxima de las distintas fundiciones.....	83

## **RESUMEN**

En el primer capítulo, se expone las propiedades del aluminio puro, del aluminio AA7075-T6 como un material maleable el cual posee una rigidez menor al del acero, comparado bajo la norma internacional ASTM y su normalización de las probetas para la experimentación y obtención de sus propiedades mecánicas a tracción. Se muestra el tipo de fundición usado, vertical – horizontal, sobre el cual se realizarán los ensayos.

En el segundo capítulo, se describe el procedimiento usado en la fundición con porcentaje de Prodax y la representación gráfica del mismo. El mecanizado se realizó bajo normas ASTM para pruebas destructivas de las probetas. Obteniéndose así los datos de las propiedades mecánicas del nuevo material, los cuales al cumplir con los requerimientos técnicos y económicos que la industria exige, se les pueda dar uso.

En el tercer capítulo, se muestra los resultados cuantitativos, mediante gráficas de las pruebas destructivas, desplazadas al 0.2% de la deformación máxima, para proyectar una recta que intersecte con la curva original y se determine el punto donde empieza la zona de ruptura. Dato que brinda facilidad práctica de decisión en los análisis de ingeniería.

Se puede concluir que la aleación permite tener un nuevo material con las propiedades mecánicas adecuadas para la industria, realizando piezas mediante fundición con material reciclado de prodax. Con esto se disminuye los costos financieros y ecológicos, al sustituir la materia prima de aluminio puro por material reciclado obtenido de la viruta de prodax liberada en procesos de mecanizado de otras piezas, y menor contaminación del medio ambiente al ahorrarse los procesos del tratamiento de aluminio puro.

## ABSTRACT

Existen varias aplicaciones que demanda propiedades como menor rigidez, menor esfuerzo y mayor ductilidad, que no incurran en costos altos. Por ello se ha requerido el desarrollo de aleaciones que permitan contar con las propiedades requeridas y a bajos costos. Dentro del estudio técnico de la ciencia de materiales, se ha enfocado o limitado a la investigación de resistencia del material mediante el sometimiento a distintos esfuerzos como ensayos de tracción, dureza, choque, fatiga conocidos como ensayos tecnológicos del aluminio con material reciclado de AA7075-T6. Los experimentos que se han realizado han sido tendientes a encontrar la proporción adecuada entre el 10%, 20% y 30% de la aleación que permita alcanzar los mejores resultados, bajo las normas internacionales ASTM y su normalización de las probetas para experimentación y obtención de las propiedades mecánicas a tracción.

El resultado de este estudio experimental ha indicado que la mejor aleación generada con un 30% de material reciclado y fundición en perpendicular teniendo una resistencia al límite de fluencia de 57 MPa.

There are several applications that demand properties such as less stiffness, less effort and greater ductility, which do not incur high costs. For this reason, the development of alloys has been required to provide the required properties at low costs. Within the technical study of materials science, it has focused or limited to the investigation of resistance of the material by subjecting it to different efforts such as tensile, hardness, shock, fatigue tests known as technological tests of aluminum with recycled material from AA7075- T6. The experiments that have been carried out have tended to find the appropriate proportion between 10%, 20% and 30% of the alloy that allows achieving the best results, under international ASTM standards and their standardization of the test pieces for experimentation and obtaining its tensile mechanical properties.

The result of this experimental study has indicated that the best alloy generated with 30% recycled material and cast in perpendicular having a yield strength of 57 MPa.

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como finalidad revisar los procedimientos de fundición y análisis de las propiedades mecánicas a tracción. El estudio está centrado en realizar probetas con variación de aluminio AA7075-T6 reciclado en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana -UPS con el propósito de comparar entre los resultados de la fundición paralela con la fundición perpendicular y determinar cuál dirección brinda mejores propiedades mecánicas a tracción.

En el capítulo I, nos encontramos con el Marco Teórico, conceptos y definiciones fundamentales de diferentes autores sobre el aluminio puro y sus aleaciones, propiedades mecánicas, normas ASTM, proceso de fundición, fundición en paralelo, fundición en perpendicular, entre otros. Para obtener los mejores resultados en la investigación.

En el capítulo II, se encuentra la metodología de trabajo utilizada en el desarrollo de la investigación, destacando los aspectos significativos. Estudios y averiguaciones anteriores que sirvieron de base para la realización y objetividad del proyecto; en las cuales se muestran las bases teóricas y sus definiciones. Los resultados están representados mediante tablas.

En el capítulo III, se desarrolla el análisis e interpretación de los resultados, mediante la observación de las gráficas de medidas de dispersión, determinando así la influencia de las propiedades mecánicas como el esfuerzo máximo, esfuerzo de fluencia, módulo de elasticidad y deformación unitaria, además se comparará los resultados de la fundición en paralela con la fundición perpendicular.

Seguidamente se referencian las fuentes bibliográficas utilizadas en la investigación, que son parte de la investigación.

Finalmente, los anexos se presentan y muestran evidencias fotografías que sirvieron de soporte técnico que validan los instrumentos utilizados en el estudio.



# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Aluminio

El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre, por encima del hierro. Constituye casi el 8% de la corteza terrestre, y su producción ocupa el segundo lugar, después del acero. El principal mineral para el aluminio es la bauxita, un óxido hidratado que contiene agua de aluminio e incluye diversos óxidos [1].

El proceso de obtención del elemento aluminio (Tabla periódica, familia IIIA) es muy contaminante y requiere gran cantidad de energía, lo que incrementa de modo significativo al costo de la producción del aluminio comercial o industrial. Esta es la razón que rentabiliza el reciclado a partir de las chatarras, con mucho menor consumo de energía. Sin embargo, en industrias especializadas, como el sector aeroespacial solo utilizan aluminio de primera fusión (no reciclado) [2], esto es no material reciclado.

### 1.2. Aluminio y sus aleaciones

El aluminio puro tiene una densidad de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , considerados en los denominados metales ligeros. Respecto a las propiedades mecánicas, el aluminio posee una rigidez bastante baja, con un límite elástico del orden de los 70 GPa, comparado a los 200 GPa de los aceros. En general todos los aleantes elevan el módulo elástico y también aumentan la densidad. El aluminio puro también tiene muy baja dureza y resistencia, lo que no lo hace apto para usos estructurales, pudiendo mejorar esas características empleando diversos mecanismos de endurecimiento [3].

Existen dos grupos de aleaciones de aluminio denominados aleaciones maleables o de forja y aleaciones de fundición [4], que tiene distintas aplicaciones, pues poseen distintas propiedades mecánicas y características.

### 1.2.1. Aleaciones maleables o de forja

Este nombre lo reciben las aleaciones que se obtienen por laminación, que podrían ser forjadas si fuese necesario [4].

En la referencia [4], muestra la forma establecida de indentificar estos grupos por sus características, indicando textualmente lo siguiente:

*“Las aleaciones de aluminio forjable se identifican mediante cuatro dígitos más la severidad de temple que muestra la condición del material.*

*El primer dígito identifica el principal elemento de aleación.*

*1xxx—Aluminio comercialmente puro. Excelente resistencia a la corrosión, alta conductividad eléctrica y térmica, buena capacidad de trabajo, baja resistencia, no tratable térmicamente.*

*2xxx—Cobre. Alta relación resistencia-peso, baja resistencia a la corrosión, tratable térmicamente.*

*3xxx—Manganeso. Buena capacidad de trabajo, resistencia moderada, por lo general no tratable térmicamente.*

*4xxx—Silicio. Punto de fusión más bajo, forma una película de óxido de color gris oscuro a negro, en general no tratable térmicamente.*

*5xxx—Magnesio. Buena resistencia a la corrosión y soldabilidad, resistencia de moderada a elevada, no tratable térmicamente.*

*6xxx—Magnesio y silicio. Resistencia media; buena formabilidad, maquinabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión; tratable térmicamente.*

*7xxx—Zinc. Resistencia de moderada a muy elevada, tratable térmicamente.*

*8xxx—Otro elemento.*

*El segundo dígito en estas denominaciones indica modificaciones a la aleación. Para la serie 1xxx, el tercero y cuarto dígitos representan la cantidad mínima de aluminio en la aleación. Por ejemplo, 1050 indica un mínimo de 99.50% de Al y 1090 indica un mínimo de 99.90% de Al. En otras series, el tercero y cuarto dígitos identifican las diferentes aleaciones en el grupo y no tienen importancia numérica.”*

Ejemplo, para mostrar la composición química de una aleación de la serie 7XXX.

**Tabla 1. Composición química de aleaciones de la serie 7XXX. Porcentaje en peso.**

Aleación	% Mg	% Mn	% Cr	% Fe	% Si	% Cu	% Zn	% Zr
<b>7005</b>	1,08- 1,8	0,2-0,7	0,06-0,2	≤0,40	≤0,35	≤0,1	4,5- 5,0	0,08- 0,2
<b>7020</b>	1,0-1,4	0,05- 0,5	0,1-0,35	≤0,40	≤0,35	≤0,2	4,5- 5,0	0,08- 0,2
<b>7075</b>	2,1-2,9	≤0,3	0,18- 0,28	≤0,50	≤0,40	1,2-2,0	5,1- 6,1	----
<b>7475</b>	1,9-2,6	≤0,06	0,18- 0,25	≤0,12	≤0,10	1,2-1,9	5,2- 6,2	----
<b>7079</b>	2,9-3,7	0,1-0,3	0,10- 0,25	≤0,40	≤0,30	0,40- 0,80	3,8- 4,8	----
<b>7010</b>	2,1-2,6	≤0,1	≤0,05	≤0,15	≤0,12	1,5-2,0	5,7- 6,7	0,1- 0,16

Muestra la composición química de algunas aleaciones de la serie 7XXX., 3ra edición, Pearson,

### 1.2.2. Aleaciones de fundición

Las aleaciones de aluminio se diseñan para una adecuada colada de metal líquido por moldes que reproducen la forma de la pieza. Generalmente para fabricar piezas de forma compleja. El inconveniente del proceso de moldeo es la menor calidad micro estructural (poros, cavidades de contracción, rechupes, segregación, entre otros) [2].

Las denominaciones para las aleaciones de aluminio fundido también constan de cuatro dígitos. En la referencia [2] indican textualmente:

*“El primer dígito indica el grupo principal de la aleación, como:*

*1xx.x—Aluminio (99.00% mínimo)*

*2xx.x—Aluminio-cobre*

*3xx.x—Aluminio-silicio (con cobre y/o magnesio)*

*4xx.x—Aluminio-silicio*

*5xx.x—Aluminio-magnesio*

*6xx.x—Serie no utilizada*

*7xx.x—Aluminio-zinc*

*8xx.x—Aluminio-estaño*

En la serie 1xx.x, el segundo y tercer dígitos indican el contenido mínimo de aluminio. Para las otras series, el segundo y tercer dígitos no tienen importancia numérica. El cuarto dígito (a la derecha del punto decimal) indica la forma del producto.”

La figura 1 muestra el diagrama de equilibrio Aluminio-Zinc. Donde se puede apreciar las fases disponibles en esta aleación y su temperatura de fusión.

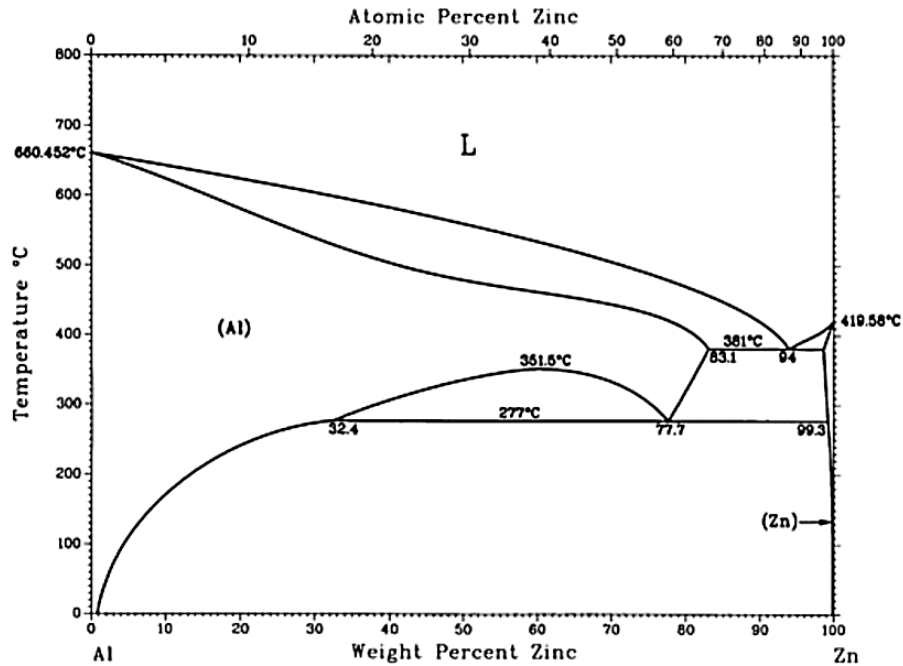


Figura 1. Diagrama de fase aluminio - zinc

El presente proyecto tiene la finalidad determinar las propiedades mecánicas del material reciclado 7075 T6 y fundido con aluminio puro en molde de arena, es por ello por lo que, se menciona las especificaciones de la serie 7XXX.

### 1.3. Aleación de aluminio Al-Zn-Mg (serie 7 XXX)

Son aleaciones tratables térmicamente, logrando endurecerse de forma muy eficaz, tanto en la maduración natural como en maduración artificial. En estas aleaciones el zinc forma, junto con el magnesio, los precipitados endurecedores durante el tratamiento. En ausencia de Mg, el zinc es poco eficaz como endurecedor y, de hecho, cuanto mayor sea la cantidad de Zn + Mg, mayores son las características mecánicas [2].

En cuanto al cobre, tiende a empeorar el comportamiento a corrosión general, pero mejora la corrosión bajo tensión y aporta endurecimiento por precipitación. El manganeso también es utilizado, aunque con menor importancia. Finalmente, el hierro y el silicio son

impurezas inevitables, que siempre aparecen en la composición química, y forman compuestos inter metálicos deteriorando la tenacidad [2].

En la tabla 2 [2], nos indica:

**Tabla 2. Propiedades mecánicas a tracción de diferentes aleaciones de aluminio para forja tratables térmicamente, en distintos estados de tratamiento.**

<b>Aleación</b>	<b>Estado</b>	<b>Esfuerzo Fluencia [MPa]</b>	<b>Esfuerzo Máximo [MPa]</b>	<b>Alargamiento [%]</b>
<b>2014</b>	T6	390	440	7
<b>6061</b>	T6	240	290	7
<b>7020</b>	T6	280	350	8
<b>7075</b>	T6	470	540	7
<b>7075</b>	T76	425	500	7

Propiedades mecánicas a tracción de diferentes aleaciones de aluminio para forja tratables térmicamente, en distintos estados de tratamiento, Fuente: Alfredo Güemes.

#### 1.4. Propiedades mecánicas

Para evaluar las propiedades mecánicas a tracción de las probetas, se utilizará una máquina universal de ensayos Marca ‘Test Resources’ de la carrera de ingeniería mecánica de la Universidad La Salesiana.

#### 1.5. Ensayo a Tracción.

Consiste en someter con una carga axial gradualmente creciente a una probeta preparada según normas establecidas. Cuando se realizan debidamente en probetas adecuadas, estos ensayos pueden brindar información de las propiedades mecánicas fundamentales.

la probeta se monta en la máquina de pruebas y se carga lentamente en tensión axial mientras se observan la carga  $P$  [N] y la extensión [mm] que registra el computador. La carga se convierte en esfuerzo mediante la fórmula:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Dónde:  $A_0 = \pi \cdot \frac{d_o^2}{4}$  es el área original de la probeta [mm<sup>2</sup>].

La posición que registra el computador es el alargamiento axial (*deformación*) que soporta la probeta en cada instante y ese alargamiento es:

$$\Delta l = l - l_0 \text{ [mm]} \quad (2)$$

Durante la prueba, la carga y deformación se registrará en un sistema de adquisición de datos 100 datos/segundo y se creará un archivo; esto luego se analiza y se pueden crear varios diagramas de propiedades del material.

### 1.5.1. Diagrama Esfuerzo [MPa] – Deformación unitaria [mm/mm]

A partir de los datos de carga y posición, se puede obtener el diagrama de ingeniería esfuerzo vs deformación unitaria que se usa para obtener varias propiedades del material.

La deformación unitaria se define como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \right] \quad (3)$$

El esfuerzo a la fluencia se define como:

$$\sigma_y = \frac{P_y}{A_0} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (4)$$

Donde  $P_y$  es carga en la fluencia

El esfuerzo máximo es denominado esfuerzo último o también resistencia a la tracción, se define:

$$\sigma_u = \frac{P_u}{A_0} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (5)$$

En la figura 2 se representa un diagrama esfuerzo vs deformación unitaria que se obtuvo a partir de los datos de carga vs deformación del aluminio dulce obtenido por fundición.

**Figura 2.** Diagrama esfuerzo vs deformación unitaria del aluminio dulce.

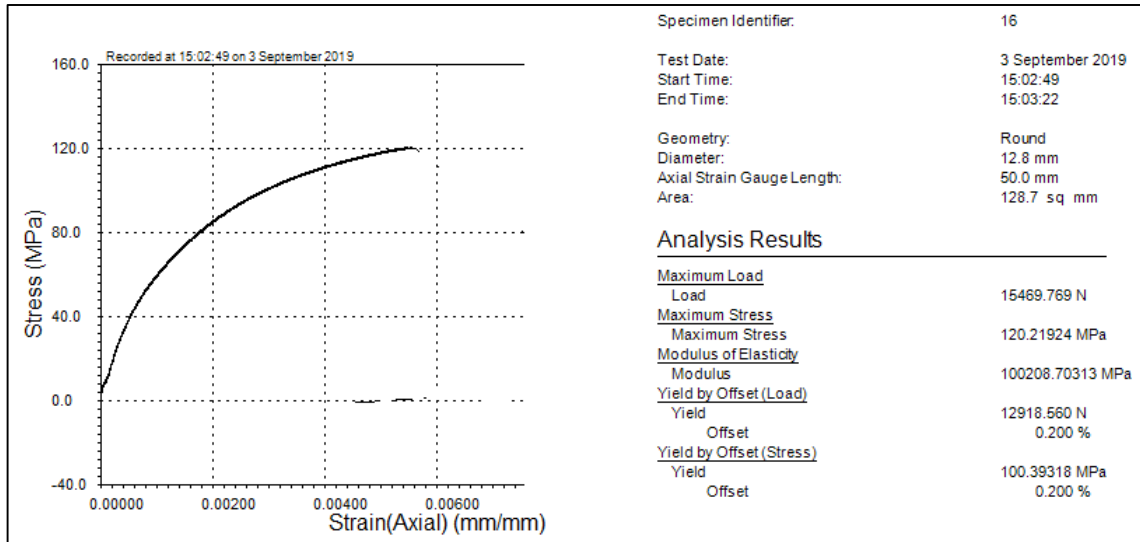


Diagrama esfuerzo vs deformación unitaria del aluminio dulce, Fuente: Autores

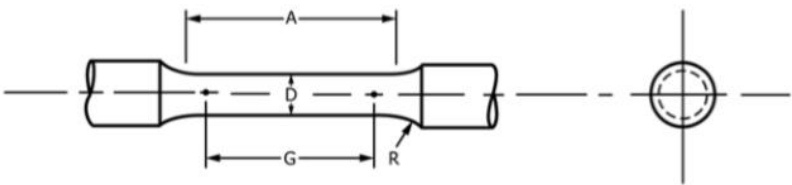
La pendiente de la parte elástica del diagrama es el módulo elástico, también llamado Módulo de Young, se define:

$$E = \frac{\sigma_y}{\epsilon_y} \quad [\text{MPa}]$$

### 1.5.2. Norma ASTM E8

Para probetas de tracción de muestras redondas, según la norma ASTM E8, La muestra de prueba redonda estándar de 12.5 mm de diámetro que se muestra en la Figura 3 se usa generalmente para probar materiales metálicos, tanto de fundición como de forjado [5].

Figura 3. Norma ASTM E 8 detalla las dimensiones de las probetas para su ensayo.



Dimensions, mm [in.] For Test Specimens with Gauge Length Four times the Diameter [E8]				
	Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional to Standard		
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4
<i>G</i> —Gauge length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	24.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]
<i>D</i> —Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]
<i>R</i> —Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]
<i>A</i> —Length of reduced section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]

Norma ASTM E 8 detalla las dimensiones de las probetas para su ensayo, Fuente ASTM.

De acuerdo a la norma ASTM E8 se realiza el diseño de la probeta a ensayar, el cual, es espécimen 1 de Diámetro 12,5 mm como se muestra en la figura 4, debido a que, en el laboratorio de resistencia de materiales se tiene un extensómetro axial “*Strain Gauge*” de longitud 50 mm marca “*Epsilon*” modelo 3542-050M-025-ST. La figura 5 muestra el certificado de calibración del extensómetro a utilizar.

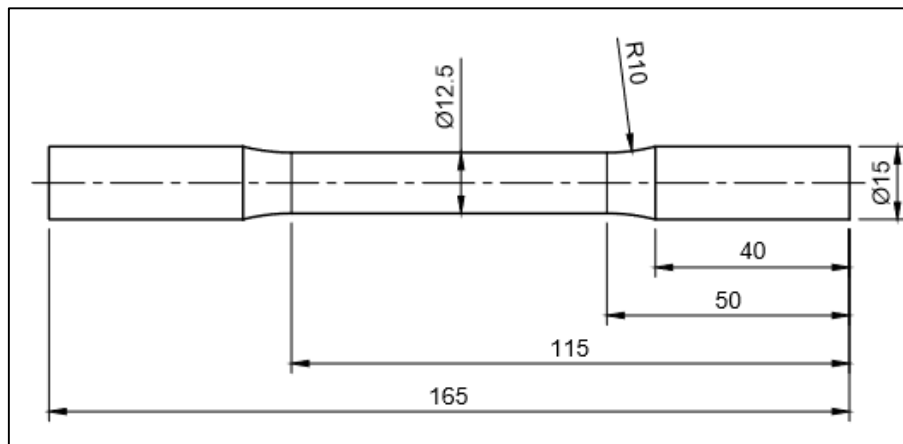


Figura 4. Diseño y dimensiones de la probeta según norma ASTM E8



TESTRESOURCES		Certificate of Calibration						
<b>CUSTOMER NAME:</b> Quion		Calibration Date	7-Feb-17					
		Calibration Due Date	8-Aug-18					
Model	3542-050M-025-ST	System Assy. No.	1608018-01					
Serial No.	E98334	System Model	315R					
Gauge Length	50 mm	System Channel	Strain AXIAL					
Strain %	25 %	Units	mm					
Resolution	0.0001	Calibration File:	E98334_50mmGaugeLength					
<hr/>								
<b>STANDARDS</b>		<b>Classification</b>	<b>Lower Limit</b>	<b>Serial No.</b>	<b>Last Cal</b>	<b>Valid Until</b>		
Epsilon Technology 3590VHR		B-1	0.005	A5247	9-Nov-16	9-Nov-18		
<b>Above Standards are traceable to the National Institute of Standards and Technology.</b>								
Temperature (F)	66							
Method of gage length verification	Direct							
Method of attaching	Round Clips							
<b>Gage Length Verification</b>								
<b>Run</b>	<b>Measured</b>	<b>Error (in/in)</b>	<b>Error (%)</b>	<b>Class</b>				
1	50.0365	0.0016	0.073	A				
2	49.9877	-0.00042	-0.0246	A				
<b>Strain Verification</b>								
Full Scale	Applied Range (% strain)	Applied Strain (% strain)		Extensometer Readout (% strain)		Maximum Error (mm/mm) (% strain)		Class ASTM E83
		Run 1	Run 2	Run 1	Run 2	Fixed	Relative	
2.00%	0.50	0.50564	0.50220	0.50740	0.50740	0.00005	1.02840	B-1
4.00%	1.00	1.00304	1.00024	1.00600	1.00760	0.00007	0.73377	B-1
8.00%	2.00	2.04112	2.00172	2.05040	2.01200	0.00010	0.50365	B-2
14.00%	3.50	3.51184	3.50152	3.51960	3.50660	0.00008	0.22097	B-1
20.00%	5.00	5.00092	5.00648	5.01360	5.01360	0.00013	0.25355	B-1
40.00%	10.00	10.00424	10.00676	10.00860	10.00860	0.00004	0.04358	B-1
60.00%	15.00	15.00784	15.00132	15.01700	15.01700	0.00016	0.10448	B-1
80.00%	20.00	20.01408	20.00312	20.02640	20.02640	0.00023	0.11632	B-1
100.00%	25.00	24.98280	24.98284	25.00040	25.00040	0.00018	0.07045	B-1
<b>Classification of Extensometer:</b>		<b>B-2</b>						
Procedure Followed based on ASTM E83								
<b>Calibration Performed by:</b>		Andrew Thorson						
<b>Calibration Reviewed by:</b>		Gregg Ridlon						

Figura 5. Certificado de calibración extensómetro axial

## 1.6. Dirección de fundición para ensayos

Una de las variables a ser experimentadas en este proyecto es la dirección de fundición, se han determinado desarrollar la fundición en dirección perpendicular y paralela.

### 1.6.1. Dirección perpendicular

La figura 6, muestra el detalle de la dirección de la fundición perpendicular del producto o probeta a obtener, también indica la masa del material que sirve para determinar aproximadamente la cantidad de material a utilizar.

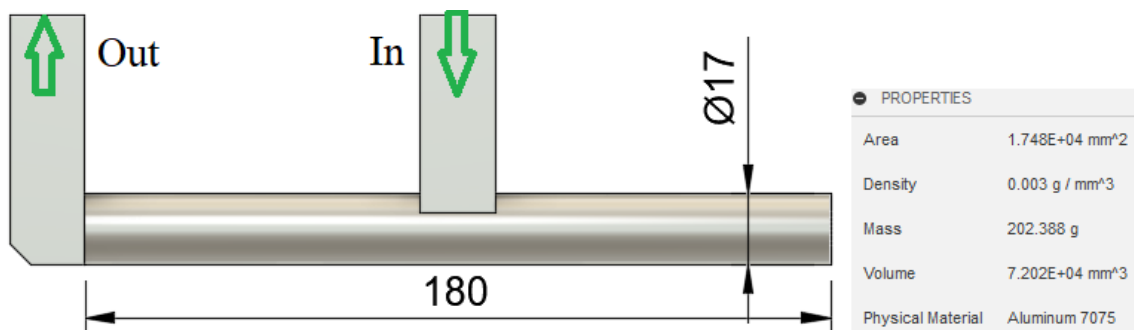


Figura 6. Dirección de fundición perpendicular

### 1.6.2. Dirección paralela

La figura 7, muestra el detalle de la dirección de la fundición paralela del producto o probeta a obtener, también indica la masa del material que sirve para determinar aproximadamente la cantidad de material a utilizar.

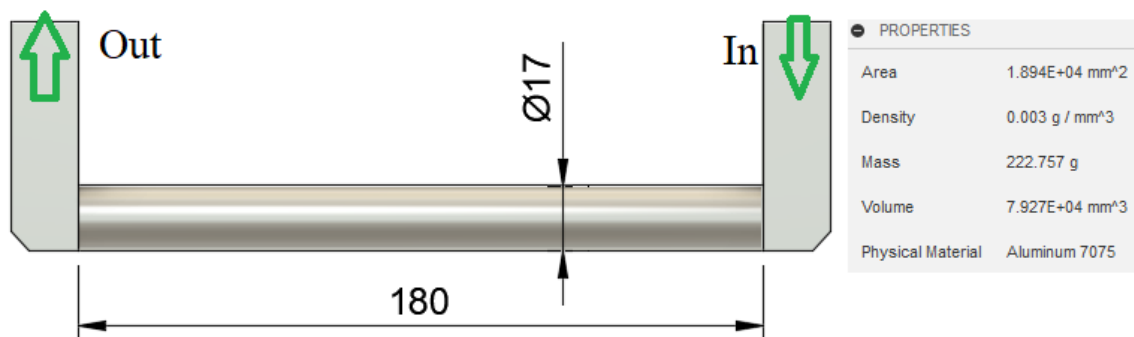


Figura 7. Dirección de fundición paralela.

Tabla 3. Peso del aluminio dulce y de reciclado para utilizar en los ensayos

Ens.	Al Dulce [%]	AA 7075 [%]	Ingreso	Peso c/u [Kg]	Muestras Cant.	Peso de Al. Dulce [Kg]	Peso de AA 7075 [Kg]	Peso Total [Kg]
1	90%	10%			5	1,13	0,13	1,3
2	80%	20%	Paralelo	0,25	5	1,00	0,25	1,3
3	70%	30%			5	0,88	0,38	1,3
4	90%	10%			5	0,92	0,10	1,0
5	80%	20%	Perpendicular	0,205	5	0,82	0,21	1,0
6	70%	30%			5	0,72	0,31	1,0

7	100%	0%	Paralelo	0,25	5	1,25	0,00	1,3
8	100%	0%	Perpendicular	0,205	5	1,03	0,00	1,0
<b>Total</b>				<b>40</b>	<b>7,74</b>	<b>1,37</b>	<b>9,1</b>	

Tabla de Peso del aluminio dulce y de reciclado para utilizar en los ensayos, Fuente: Autores.

## 1.7. Fundición

La fundición de metales basa su proceso en: fundir el metal, vaciarlo en un molde y dejar enfriar el mismo. Su principal ventaja es la producción de piezas con geometrías complejas y de gran tamaño. Los materiales a fundir deberán tener propiedades óptimas de fusibilidad y colabilidad, necesarias para la fundición, como en aleaciones de hierro, cobre y aluminio [3].

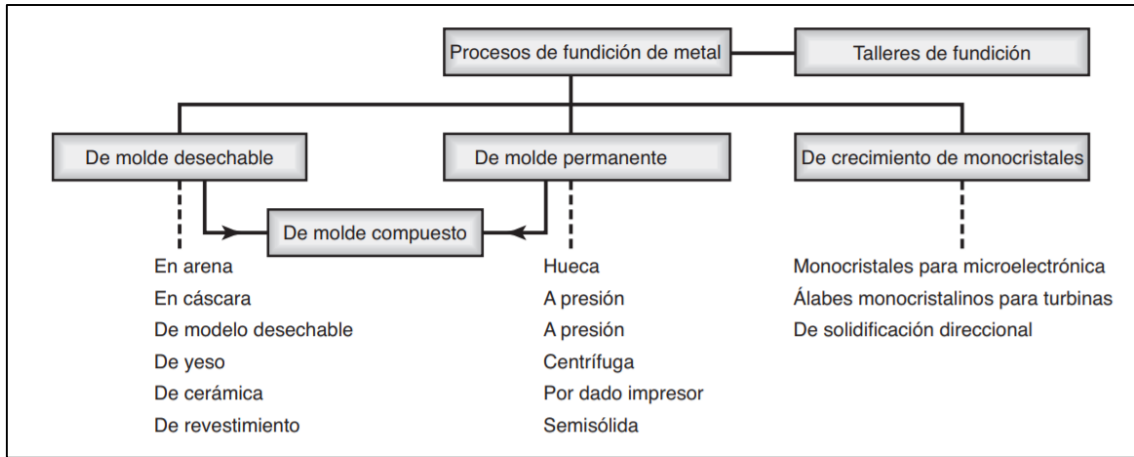
En el proceso de fundición cuando el metal fundido empieza a enfriarse se provoca un cambio de fase en el material, lo cual provoca que se disipe una considerable cantidad de calor con lo cual se establecen muchas de las propiedades y características del metal fundido como son las propiedades mecánicas y microestructura que dependen de la velocidad de enfriamiento; las mismas que pueden estar determinadas por el tipo de fundición en el cual hayan sido realizados. Dando como resultado un tamaño de grano característico [1].

Como indican en la referencia [1], con la ayuda de técnicas modernas de procesamiento y el control de la composición química, las propiedades mecánicas de las fundiciones pueden igualar a las de otros procesos de manufactura [1].

### 1.7.1. Procesos de fundición

El proceso de fundición establecido consta de estos pasos básicos: (a) se vacía metal fundido en un molde con la forma de la parte o pieza a manufacturar, (b) se deja solidificar, y (c) se retira la parte del molde [1].

En la figura 8 se muestran los procesos de fundición desarrollados más relevantes.



**Figura 8.** Diagrama de los procesos de fundición de metales.

Casi todos los metales se pueden fundir en la forma final deseada o muy cercana, requiriendo operaciones menores de acabado. Este hecho coloca a la fundición entre las tecnologías más importantes de la manufactura de forma neta, junto con el forjado de forma neta [1].

Cada tipo de fundición le acompañan diferentes resultados obtenidos al final del proceso, y según esto será beneficioso o no el tipo de fundición escogida. En la Tabla 4 se presentan este análisis entre los diferentes tipos de fundición.

**Tabla 4. Análisis entre los diferentes tipos de fundición.**

Proceso	Ventajas	Limitaciones
<b>Arena</b>	El llenado de los moldes se puede hacer prácticamente con cualquier metal; no hay límite de tamaño, forma o peso. El costo de herramienta bajo.	Se requiere acabado posterior, acabado áspero, tolerancias amplias.
<b>Moldeo cascara</b>	Buena precisión dimensional y acabado superficial, alta velocidad de producción.	Restricción del tamaño del producto, se requieren modelos y equipos costosos.
<b>Molde permanente</b>	Acabado superficial y precisión dimensional aceptable, porosidad baja, velocidad de producción alta.	Costo del molde elevado, forma y complejidad limitados,

no adecuado para metales de alto punto de fusión.

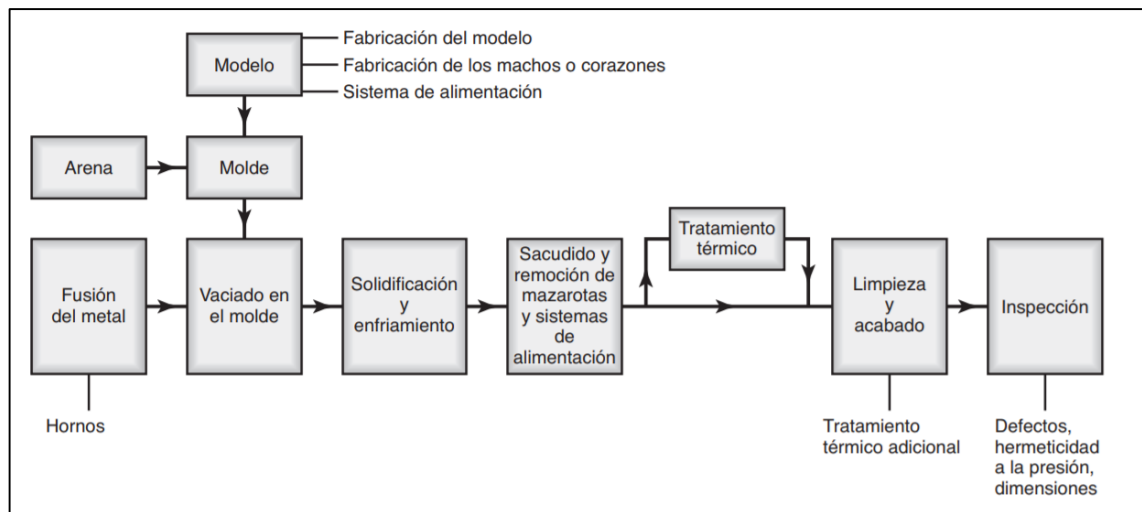
**Centrifugo**      Grandes piezas cilíndricas de buena calidad, alta velocidad de producción

El equipo es costoso, la forma de producción es limitada.

Peso del aluminio dulce y de reciclado para utilizar en los ensayos, Fuente: Autores.

### 1.7.2. Fundición en molde de arena

En los moldes de arena su uso es único, es decir, una vez solidificado el producto el molde se lo destruye; a estos moldes se los conoce como moldes temporales. Los moldes de arena permiten trabajar con metales de alto punto de fusión como son el acero y níquel. La fundición en arena comienza con la fabricación del modelo de la pieza a fundir, luego este modelo se coloca entre la arena, con una humedad del 9%, para generar una cavidad negativa y se ubican los sistemas de alimentación que guían el metal fundido hacia las cavidades del molde, una vez solidificado y enfriado se destruye el molde y se extrae la pieza para su posterior maquinado o tratamientos térmicos requeridos. En la figura 9 muestra el proceso de fundición en moldes de arena.



**Figura 9.** Proceso de fundición en arena. Autores

Los moldes de arena ver figura 10, su caracterización de da por los tipos de arena y por los métodos utilizados para producirlos.

Existen tres tipos básicos de moldes de arena:

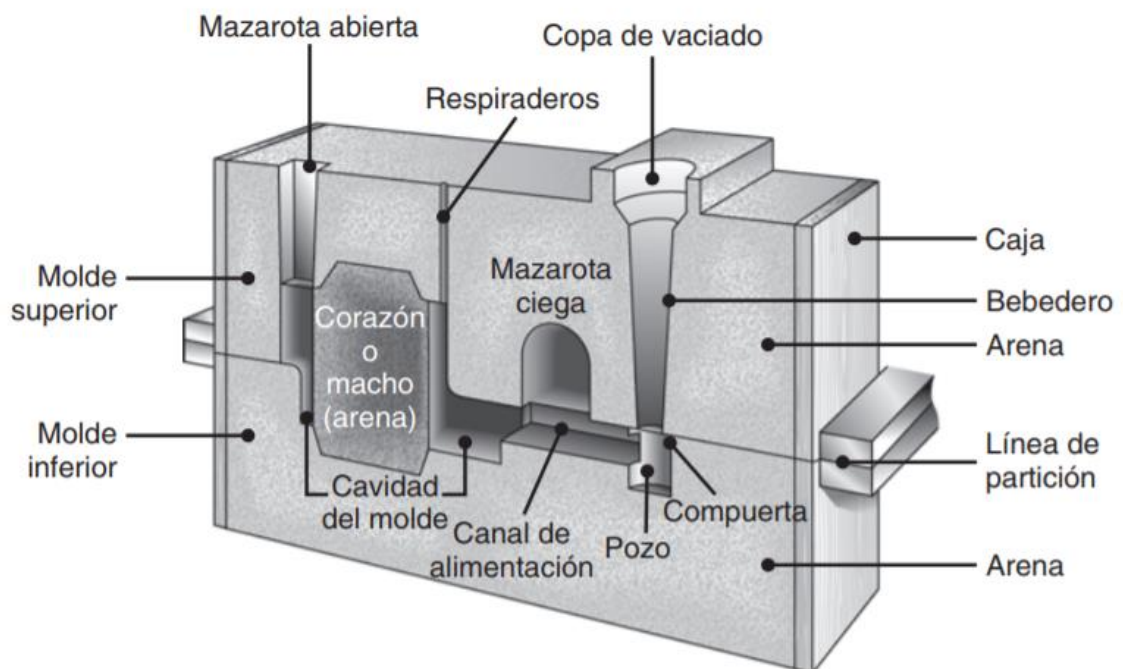
- de arena verde
- de caja fría
- sin cocción.

Para moldeo, el material más común es la arena verde, que es una mezcla de arena, arcilla y agua. El término “verde” indica que la arena dentro del molde está húmeda o mojada mientras se vacía el metal en su interior. Como la arena reciclada puede ser reusada, este método es el menos costoso para la fabricación de moldes.

En el método de superficie seca requiere que la superficie del molde esté seca, para ello se guarda este en aire o secándolo con sopletes. Dando mayor resistencia a los moldes se utilizan generalmente para fundiciones de piezas grandes.

El proceso de molde de caja fría se realiza mediante diversos aglutinantes orgánicos e inorgánicos con la arena, con lo cual se unen químicamente los granos y se obtiene mayor resistencia. Estos moldes permiten obtener piezas con dimensiones de mayor precisión que con los de arena verde, pero son más costosos.

En el proceso de molde no cocido se agrega una resina sintética líquida a la arena y la mezcla se endurece a temperatura ambiente. Debido a que el aglutinamiento del molde en este proceso y en el de caja fría ocurre sin calor, se les llama procesos de curado en frío.



**Figura 10.** Esquema de un molde de arena mostrando diferentes características, Pearson.

### **1.7.3. Solidificación y enfriamiento**

Una vez colado el metal en el molde, éste se enfría y solidifica pasado un tiempo específico según: el material fundido, el tipo de molde, factores ambientales, etc. Dentro de los aspectos asociados al enfriamiento están:

- El tiempo de enfriamiento del metal
- La contracción
- La solidificación direccional
- El diseño de las mazarotas.

## CAPÍTULO II

### 2. MODELO EXPERIMENTAL

#### 2.1 Metodología de trabajo

La metodología de trabajo para realizar los procedimientos de fundición y el análisis de las propiedades mecánicas a tracción, se realizarán en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana -UPS.

Se realizará una serie de etapas para la elaboración de las probetas que serán ensayadas en los laboratorios de Resistencia de materiales, dichas etapas se detallan a continuación en la siguiente tabla.

**Tabla 5. Etapas de la metodología de trabajo**

ETAPAS	PROCESO	DESCRIPCIÓN
1.-	Verificación del funcionamiento y mantenimiento de equipos	Mantenimiento de equipos para la fundición
2.-	Obtención de lingotes de aluminio y reciclaje de AA 7075-T6	Obtención del aluminio
3.-	Preparación de moldes de fundición	Molde de arena
4.-	Fundición del aluminio y AA	Fundición del aluminio y el AA 7075-T6 en dirección paralela y perpendicular al molde de arena



7075-T6

	Maquinado de probetas para ensayos	
5.-		Preparación de probetas según normativa ASTM
	Ensayo a tensión	
6.-		Obtención de propiedades mecánicas a tensión

---

Tabla de Etapas de la metodología de trabajo, Fuentes Autores.

El estudio de las propiedades mecánicas a tracción se basará en los porcentajes de material a fundir de tal manera que los materiales tengan una relación de hasta 70 – 30 como máximo y de 90 – 10 como mínimo siendo el aluminio el material predominante. Las figuras 10 y 11 muestran los lingotes de aluminio y el reciclaje de AA 7075 - T6 respectivamente.



**Figura 11.** Lingotes de aluminio, Autores.



**Figura 12.** Reciclaje de Aluminio AA 7075-T6, Autores.

### 2.1.1. Etapa1: Verificación y mantenimiento de equipos

**Tabla 6. Mantenimiento y limpieza realizados en Máquinas y Herramientas**

MÁQUINÁ	ESTADO	MANTENIMIENTO
Horno	Operable	Revisión de la entrada de aire del quemador. Revisión de fisuras en el horno.  Limpieza externa e interna del horno.



Cajas de moldeo

Operable

Revisión de las bisagras.  
Limpieza y cambio de topes



Cucharetas y coladores

Operable

Revisión de agujeros en colador.  
Limpieza del cucharetas.



Tabla de Mantenimiento y limpieza realizados en Máquinas y Herramientas, Fuente: Autores

Previamente al proceso de fundición se verificó los equipos en los cuales se realizó diferentes trabajos de mantenimiento preventivo y correctivo además de la limpieza de las herramientas de tal manera que, al momento de realizarse las operaciones de fundición, estas no representen un problema en el desarrollo de las actividades realizadas se detallan a en la tabla 2.

### 2.1.2. Elaboración de lingotes de aluminio

El material que sirvió de estudio en esta investigación fue adquirido mediante la fundición de aluminio y AA 7075-T6 reciclado. La fundición de los lingotes de aluminio se realizó en la empresa FUNCOP, obteniendo como materia prima para el estudio lingotes de 800 gr como se puede observar en la figura 12. mientras el reciclado de AA 7075 – T6 se obtuvo de la viruta que se adquiere al mecanizar el material en las practicas del laboratorio de CNC como se puede observar en la figura 13. La composición de estas aleaciones se detallará más adelante.



**Figura 13.** Lingotes de aluminio, Autores



**Figura 14.** Reciclaje de AA 7075-T6, Autores

### **2.1.3. Preparación de los moldes de fundición**

La arena de moldeo está compuesta por arena y arcilla (bentonita), esta arcilla es el aglutinante y proporciona la cohesión que la mezcla necesita; mientras que la arena, en mayor proporción, contribuye a la resistencia necesaria para evitar desmoronamientos y mantener las formas requeridas del molde.

En primer lugar se debe tamizar la arena, para garantizar una uniformidad y evitar grumos en la mezcla como se puede observar en la figura 14, lo siguiente a esto y con la ayuda de una caja de madera con las dimensiones adecuadas para las probetas obtenidas, se fabrica el molde a partir de un modelo de probeta comparable con el proceso de molde permanente de diámetro 20mm y 200mm de largo, para este proceso de moldeo se utilizarán moldes gasificables como se observa en la figura 15 de esta manera se facilitará la elaboración de los lingotes fundidos.

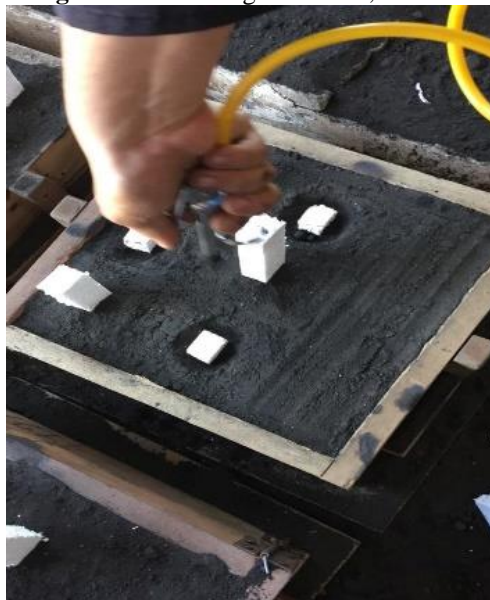
Es necesario e indispensable el uso de conductos para el escape de gases, y evitar así defectos tales como una alta porosidad en el material. La figura 16 muestra la disposición del molde y el modelo.



**Figura 15.** Tamizado de arena, Autores.



**Figura 16.** Moldes gasificables, Autores.



**Figura 17.** Caja de moldeo, Autores

## 2.1.4. Fundición del aluminio y AA 7075 – T6

### 2.1.4.1. Fundición del aluminio al 10 %

Con la adquisición de los lingotes de aleación de aluminio y el reciclaje de AA7075 – T6 se procede a realizar la fundición en el horno del Laboratorio de Fundición de la Universidad Politécnica Salesiana.

Se depositan 20 Kg de aleación de aluminio en forma de lingotes dentro del crisol, siguiente se enciende el horno el cual elevará la temperatura del crisol hasta llegar al punto de fusión del aluminio que es  $720^{\circ}\text{C}$  como se conserva en la figura 18. Para este proceso se llevó un control de temperatura a través de una termocupla tipo K.



**Figura 18.** Horno encendido, Autores.

Alcanzada la temperatura de fusión y en un tiempo de aproximadamente 90 minutos, se procedió a retirar la escoria y extraerla para obtener un material fundido libre de impurezas.

Es necesario alcanzar una temperatura mayor a la de fusión ( $660^{\circ}\text{C}$ ) antes de colar, se recomienda entre  $50 - 100^{\circ}\text{C}$  por sobre la temperatura de fusión para asegurar la fluidez del material. Se vierte en los moldes antes preparados como se puede observar en la figura 18.



#### **2.1.4.2. Colado en molde de arena.**

Con el molde de arena preparado se procede a verter el material por la cavidad de ingreso y se lo deja enfriar hasta que solidifique como se observa en la figura 19.



**Figura 19.** Colado del material, Autores

#### **2.1.5. Extracción y Maquinado de probetas para ensayos**

##### **2.1.5.1. Extracción de probetas para ensayos**

Según la norma B557M para fundiciones en donde el espesor supera los 40 mm, se debe tomar el centro de la fundición para extraer las probetas mediante maquinado, como se observa en la figura 20. Además, las probetas deben tener un acabado superficial de 1.6  $\mu\text{m}$  como mínimo.

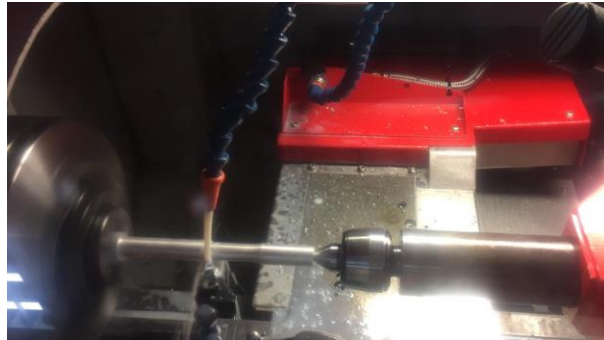


**Figura 20.** Obtención de material, Autores



### **2.1.5.2. Maquinado de probetas para ensayos**

El maquinado de probetas partió de las piezas obtenidas en la fundición como se muestra en la figura 21 a través de un proceso de torneado, y corte. Se obtuvo las diferentes probetas en relación con el tipo de fundición para los ensayos de tracción, según las normas ASTM.



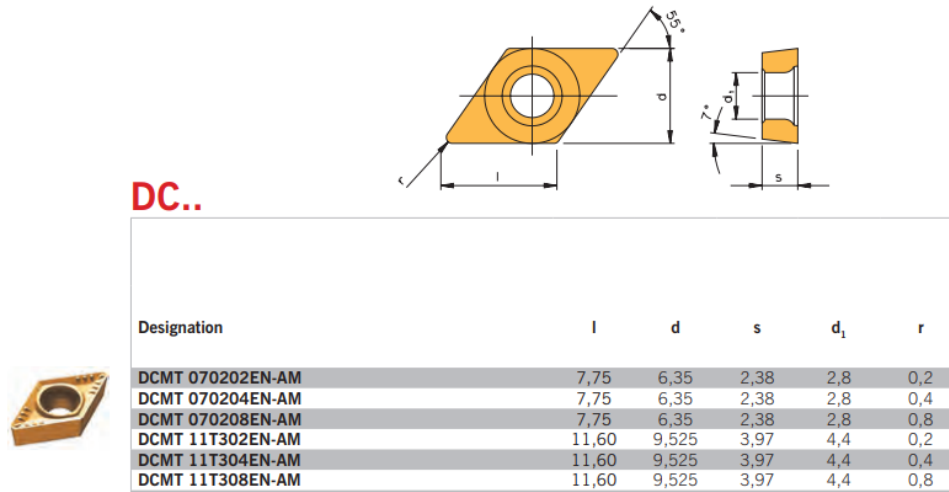
**Figura 21.** Maquinado de probetas, Autores.

### **2.1.5.3. Parámetros de corte en torneado**

Los parámetros de mecanizado, se seleccionan para obtener el adecuado funcionamiento de la herramienta, generando un desgaste uniforme y predecible. Así se consigue que la pieza de trabajo alcance una rugosidad superficial adecuada [11].

Para un buen terminado de la pieza, tal que cumplan especificaciones dadas, el diámetro de la pieza influye en la calibración de los parámetros considerados en el proceso de torneado, como son: velocidad de husillo, velocidad de corte, avance, profundidad de corte.

Se deberá tomar en cuenta el inserto a ser utilizado para el proceso de cilindrado de las probetas, la figura 22 muestra el inserto a ser utilizado de marca ARNO y que tiene el código DCMT 11T304 con un revestimiento AK10.



**Figura 22.** Geometría del Inserto DCMT 11T304, Marca Arno.

Se utilizará este inserto debido a que en los laboratorios de CNC de la Universidad Politécnica Salesiana se cuenta con la disponibilidad de mecanizar las probetas con estas herramientas pues son las mismas que usualmente se utilizan en el laboratorio de CNC.

La figura 23 muestra los valores de velocidad de corte según el catálogo ARNO para un material de aluminio utilizando un inserto DCMT 11T304 con un revestimiento AK10.

La tabla 7 muestra los valores de velocidad de corte (m/min), avance por minuto (mm/min) y profundidad de corte a utilizarse para el mecanizado de las probetas de aluminio, así como para las probetas que se obtengan de las variaciones de aluminio AA7075-T6 y fundición de aluminio.

En esta investigación la velocidad del husillo como límite máximo es 5000 rpm, puesto que el torno CNC EMCOMAT E-200 no supera esta velocidad.

ISO	Material	Cutting speed Vc [m/min]			
		AK1020	AK10	AK20	
N	Aluminum alloys, long chipping	not heat treatable	300 - 2500	300 - 2500	300 - 2500
		heat treatable, heat treated	200 - 2000	200 - 2000	200 - 2000
	Casted aluminum alloys	≤ 12% Si, hardened	400 - 1500	400 - 1500	400 - 1500
		≤ 12% Si, heat treatable, heat treated	400 - 1500	400 - 1500	400 - 1500
		≤ 12% Si, not heat treatable	200 - 800	200 - 800	200 - 800
	Copper and copper alloys (brass / bronze)	Lead alloys, Pb > 1%	250 - 600	250 - 600	250 - 600
		Brass, bronze	200 - 600	200 - 600	200 - 600
		Aluminum bronze	150 - 400	150 - 400	150 - 400
		Copper and electrolyte copper	150 - 300	150 - 300	150 - 300



$$N = \frac{200 \cdot 1000}{20 \cdot \pi}$$

$$N = 3183 \text{ rpm}$$

Para el cálculo de la velocidad de avance se utiliza la ecuación 3 [10].

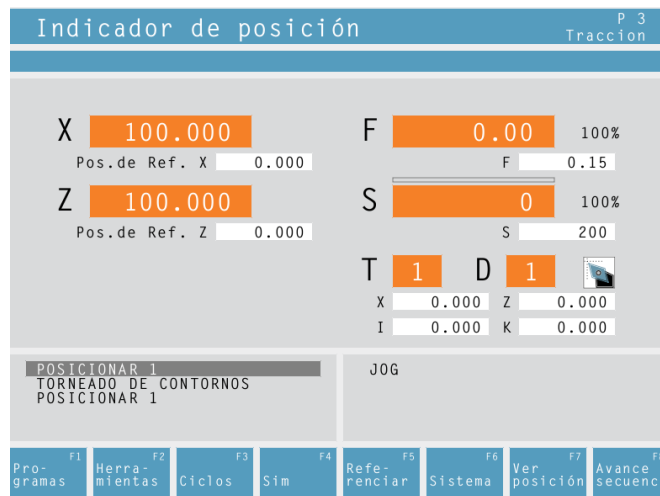
$$Vf = fn \times z \times N \quad (3)$$

$$Vf = 0,15 \times 1 \times 3183$$

$$Vf = 477.45 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Los valores obtenidos mediante el cálculo que se realizó al utilizar las ecuaciones antes mencionadas se utilizarán para la programación del torno CNC EMCOMAT E-200.

La figura 24 muestra los valores que se utilizarán en el torno CNC EMCOMAT E-200 para el mecanizado de las probetas con las que se llevará a cabo el ensayo a tracción.



**Figura 24.** Parámetros de mecanizado en el torno CNC EMCOMAT E-200

En la figura 25 se puede observar los resultados del mecanizado de los ejes fundidos, utilizando los parámetros de corte de la Tabla 6, los mismos que fueron obtenidos de las hojas técnicas y catálogos de la marca ARNO.



**Figura 25.** Probeta según Norma ASTM, Autores.

## **2.2. Ensayo a tracción**

Consiste en someter con una carga mono axial que aumenta gradualmente, con el objetivo de obtener las propiedades mecánicas del material tales como el esfuerzo de fluencia, esfuerzo ultimo a la tracción, el módulo de elasticidad y el porcentaje de elongación del material.

El procedimiento para el ensayo se realizó en la máquina universal marca “Test Resource” modelo 315 ubicada en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad Politécnica Salesiana como se muestra en la figura 26, ésta máquina trabaja con un sistema de cadenas evitando así pérdidas de fuerza por presión, se sujeta la probeta mediante mordazas como se muestra en la figura 27, posterior a esto se aplica una carga que genera el estiramiento del material hasta su rotura como se muestra en la figura 28.



**Figura 26.** Máquina Universal Test Resource, Autores.



**Figura 27.** Sujeción con mordazas, Autores.

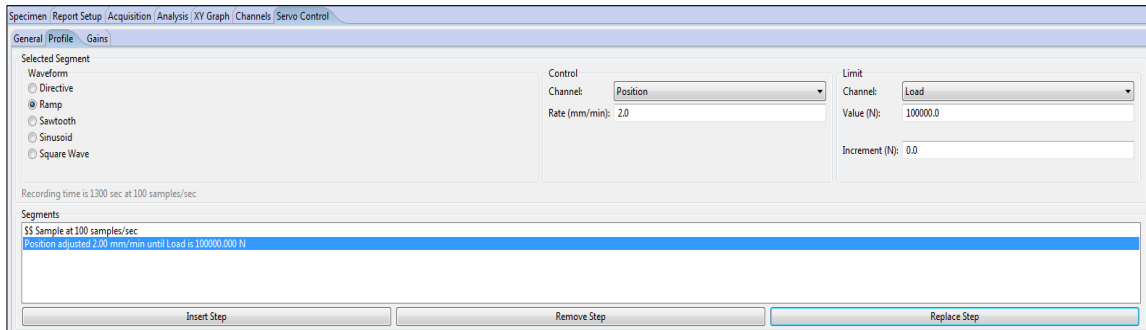


**Figura 28.** Rotura de Probeta, Autores

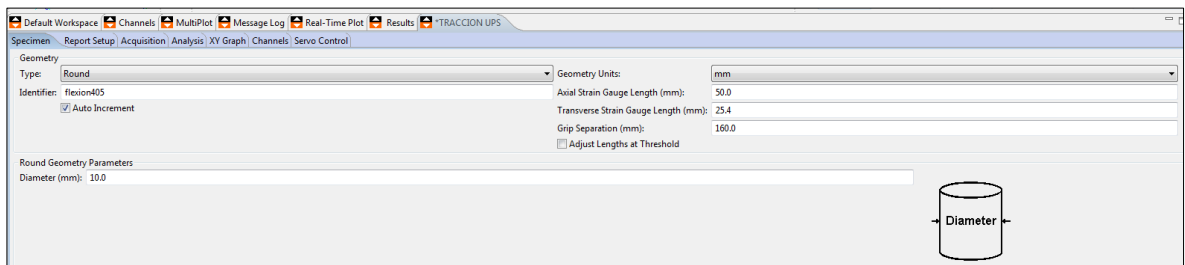
### **2.2.1. Metodología para protocolo de pruebas de ensayos a Tracción**

- Con ayuda de un CAD (Computer Asistend Design) y en el software respectivo configurar ingreso de dato de velocidad en 2mm/min, valor con el cual se desarrollará durante todo el ensayo a tracción.
- Ubicar la probeta mecanizada en la máquina de ensayos de tracción de acuerdo con la longitud calibrada de 160 mm para el inicio de la experimentación.
- Ingresar los respectivos datos de la probeta ubicada, tales como longitud inicial de 160 mm y diámetro de 10 mm.
- Posicionar extensómetro axial sobre la probeta; previamente ubicada, para medir fuerza máxima, esfuerzo máximo y módulo de elasticidad durante la ejecución de la experimentación.
- Iniciar el ensayo, aplicando el arranque de las pruebas a realizar en su correspondiente interfaz del programa RSERIES CONTROLLER.
- Continuar y verificar la tendencia de gráficas de esfuerzo - deformación al momento de inicio del experimento en el software de aplicación, hasta donde se produce la rotura de la probeta.
- Grabar en memoria de disco duro los datos obtenidos del software utilizado en el ensayo, para la realización de los respectivos cálculos mediante la correspondiente formulación.
- Repetir procedimiento para las probetas manufacturadas, de acuerdo con la norma establecida para dicha experimentación.

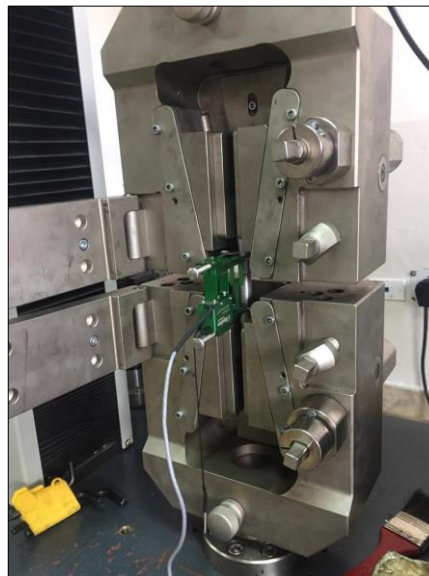
Las figuras 29, 30 y 31 muestran los pasos detallados a seguir en la metodología anterior.



**Figura 29.** Ingreso de datos según norma ASTM, Autores.



**Figura 30.** Ingreso de datos de la probeta, Autores



**Figura 31.** Colocar el sensor Axial, Autores.

## 2.2.2 Ingreso y toma de datos

En el desarrollo experimental se ingresará los datos, que se detalla a continuación:

- Diámetro calibrado de la probeta en (mm).
- Longitud calibrada de la probeta en (mm).



- Área transversal de la probeta en (mm<sup>2</sup>).

Luego del desarrollo del ensayo a tracción, se obtendrá la siguiente información:

- La fuerza máxima en (N).
- El esfuerzo máximo en (MPa).
- Módulo de Young en (MPa).

### 2.2.3 Material Base

Para poder realizar la comparación de materiales, se necesitará obtener las propiedades mecánicas a tracción del aluminio fundido con un porcentaje del 0% de material reciclado que utiliza la Universidad Politécnica Salesiana en el laboratorio de Fundición. Se realizará la fundición del material en sentido paralelo y perpendicular al molde de arena. Para lo cual después de manufacturar el material fundido se obtiene las probetas según la norma de la ASTM.

Se realizará el ensayo a tracción en tres probetas fundidas en sentido paralelo y tres probetas fundidas en sentido perpendicular al molde de arena con un porcentaje de 0% de material de aluminio AA 7075-T6 reciclado, obteniéndose los resultados que se pueden observar en la Tabla 8 y 9 respectivamente.

**Tabla 7. Esfuerzo último y módulo de elasticidad en probetas fundidas paralelas al molde de arena.**

<b>Probeta fundida paralela al molde de arena</b>	<b>Esfuerzo último MPa</b>	<b>Módulo de elasticidad MPa</b>
1	123.9	77950
2	149.63	80315
3	126.43	83260

Tabla de Esfuerzo último y módulo de elasticidad en probetas fundidas paralelas al molde de arena, Fuente: Autores.

**Tabla 8. Esfuerzo último y módulo de elasticidad en probetas fundidas perpendicular al molde de arena**

<b>Probeta fundida perpendicular al molde de arena</b>	<b>Esfuerzo último MPa</b>	<b>Módulo de elasticidad MPa</b>
--	--------------------------------	--------------------------------------

1	112.52	74805
2	125.62	76024
3	126.29	78445

Tabla de Esfuerzo último y módulo de elasticidad en probetas fundidas perpendicular al molde de arena, Fuentes: Autores.

El análisis de las hojas de cálculos entregadas por el software mostrará resultados más precisos y este análisis debe ser hecho al 0,2% de la deformación máxima que presenta el material; con que se puede trabajar para estudios de ingeniería; mostrado en la figura 31.

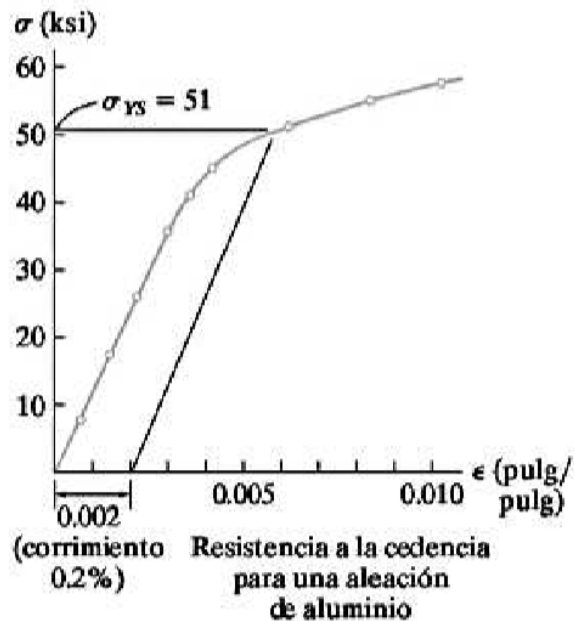
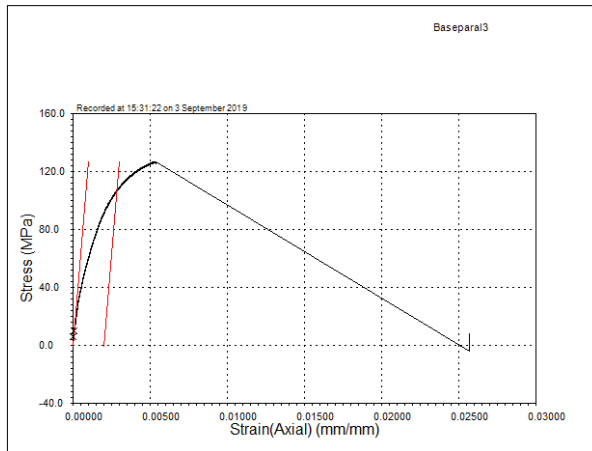
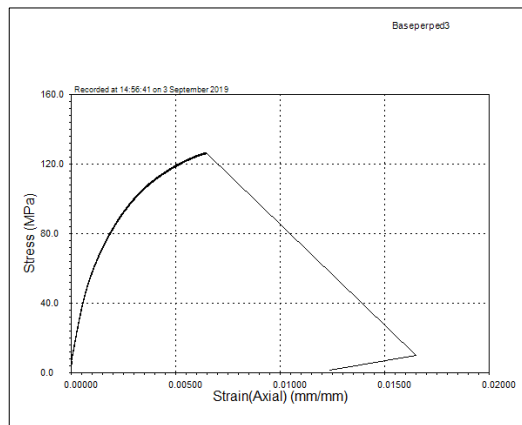


Figura 32. Gráfica de resistencia a fluencia.

Las figuras 33 y 34 muestran las gráficas del diagrama Esfuerzo - Deformación de las probetas fundidas paralela y perpendicular al molde de arena respectivamente obtenidas en la máquina de ensayos universales Test Resources, la máquina de ensayos entregará la gráfica y una hoja de datos en formato Excel la cual se analizará en el capítulo 3 debido a que la gráfica obtenida del software nos mostrará una fluencia como se puede observar en la figura 32 está cerca del punto de rotura del material.



**Figura 33.** Paralelo al molde de arena, Autores



**Figura 34.** Perpendicular al molde de arena, Autores.

En la siguiente tabla se indica los valores de Esfuerzo Máximo y Modulo de Elasticidad para las probetas fundidas en sentido paralelo al molde de arena y con los valores del 10, 20 y 30 % respectivamente de aporte de aluminio AA7075-T6 (Prodax).

**Tabla 9. Esfuerzo último y módulo de elasticidad en probetas fundidas paralela al molde de arena con sus respectivos porcentajes de material reciclado**  
**Paralelo al molde de arena**

<b>Número de Experimento</b>	<b>Porcentaje Aluminio AA7075-T6</b>	<b>Esfuerzo último MPa</b>	<b>Módulo de elasticidad MPa</b>
1		130.8	70525
2		130.44	67605
3	10%	132.5	70780
4		129.8	65450
5		130.85	64840
1		105.78	105355
2		103.85	95840
3	20%	107.5	98745
4		110.96	94578
5		114.69	94875
1		90.85	60250
2		89.7	59845
3	30%	92.87	57854
4		96.5	61250
5		94.56	56020

Tabla de Esfuerzo último y módulo de elasticidad en probetas, Fuentes: Autores

La tabla a continuación indica los valores de ‘Esfuerzo Máximo’ y ‘Modulo de Elasticidad’ para las probetas fundidas en sentido perpendicular al molde de arena y con los valores del 10, 20 y 30 % respectivamente de aporte de aluminio AA7075-T6 (Prodax).

**Tabla 10. Esfuerzo último y módulo de elasticidad en probetas fundidas perpendicular al molde de arena con sus respectivos porcentajes de material reciclado**

**Perpendicular al molde de arena**

<b>Numero de Experimento</b>	<b>Porcentaje Aluminio AA7075-T6</b>	<b>Esfuerzo último (MPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad (MPa)</b>
1	10%	105.49	67990
2		109.2	61190
3		107.65	68250
4		110.1	62490
5		108.37	66480
1	20%	103.7	84525
2		103.41	77980
3		107.9	84575
4		110.5	77250
5		103.4	79525
1	30%	109.1	63680
2		107.4	63250
3		118.63	64525
4		108.4	61950
5		106.9	62780

Tabla de Esfuerzo último y módulo de elasticidad en probetas fundidas perpendicular al molde de arena. Fuente: Autores.

### 2.2.3 Análisis probabilístico

**Media.** La media es una variable de medida de dispersión. Depende del número de datos, esto es muestra o población, lo que da la precisión del valor, y del tipo, lo que el convierte en variable aleatoria. Si la muestra es grande y está bien escogida, el valor numérico mantiene la precisión esperada y la exactitud de lo que caracteriza la propiedad objetiva de la población. Si se tiene una muestra estadística de valores ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ) para una variable aleatoria  $X$  se define como:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

**Mediana.** En estadística, la mediana es el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados.

**Desviación estándar.** Una desviación estándar indica la medida de valores de datos de una muestra que alejan de la media o tienden a estar agrupados cerca de su media. Se define así:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (2)$$

Una desviación estándar alta indica que los datos se extienden sobre un rango de valores más amplio.

**Rango.** El Rango es el intervalo entre el valor máximo y el valor mínimo

**Tabla 11. Análisis estadístico al 0% paralelo y perpendicular.**

<b>MEDIDAS</b>	<b>Esfuerzo 0% Paralelo</b>	<b>Deformación 0% Paralelo</b>	<b>esfuerzo 0% Perpendicular</b>	<b>deformación 0% Perpendicular</b>
<b>Media</b>	72,8961279	0,0023	54,21674736	0,001525397
<b>Mediana</b>	76,6334585	0,0016	53,30551693	0,001022935
<b>Desviación estándar</b>	41,1961591	0,0021	40,50816726	0,001519999
<b>Rango</b>	130,794139	0,0074	121,6258546	0,005427076
<b>Máximo</b>	133,576704	0,0074	121,6258546	0,005427076

Tabla de Análisis estadístico de esfuerzo y deformación al 0% paralelo y perpendicular, Fuente: Autores.

**Tabla 12. Análisis estadístico al 10% paralelo y perpendicular.**

<b>MEDIDAS</b>	<b>Esfuerzo 10% Paralelo</b>	<b>Deformación 10% Paralelo</b>	<b>esfuerzo 10% Perpendicular</b>	<b>deformación 10% Perpendicular</b>
<b>Media</b>	73,258047	0,002207746	51,463166	0,001328474
<b>Mediana</b>	77,2624314	0,001672869	47,51032938	0,001106673
<b>Desviación estándar</b>	38,2298924	0,001826706	32,75737524	0,001057617
<b>Rango</b>	129,501641	0,006482145	108,0784714	0,004008116
<b>Máximo</b>	130,906347	0,006484258	108,0784714	0,004008116

Tabla de Análisis estadístico de esfuerzo y deformación al 10% paralelo y perpendicular, Fuente: Autores

**Tabla 13. Análisis estadístico al 20% paralelo y perpendicular.**

<b>MEDIDAS</b>	<b>Esfuerzo 20% Paralelo</b>	<b>Deformación 20% Paralelo</b>	<b>esfuerzo 20% Perpendicular</b>	<b>deformación 20% Perpendicular</b>
<b>Media</b>	65,7565685	0,001334007	54,0292021	0,001170774
<b>Mediana</b>	69,172704	0,00111231	54,52478499	0,000985118
<b>Desviación estándar</b>	35,8543563	0,001026759	31,05936202	0,000911422
<b>Rango</b>	119,625181	0,003690354	104,3376647	0,003275274
<b>Máximo</b>	120,729738	0,003690354	105,7868631	0,003275979

Tabla de Análisis estadístico de esfuerzo y deformación al 20% paralelo y perpendicular, Fuente: Autores

**Tabla 14. Análisis estadístico al 30% paralelo y perpendicular.**

<b>MEDIDAS</b>	<b>Esfuerzo 30% Paralelo</b>	<b>Deformación 30% Paralelo</b>	<b>esfuerzo 30% Perpendicular</b>	<b>deformación 30% Perpendicular</b>
<b>Media</b>	48,1339517	0,001095049	59,92793184	0,001148525
<b>Mediana</b>	48,5978876	0,001095046	59,85002985	0,001005025
<b>Desviación estándar</b>	25,9137134	0,000667344	35,66993436	0,000817009
<b>Rango</b>	92,1764448	0,002547997	119,1839671	0,002957821
<b>Máximo</b>	92,8746314	0,002548702	120,3417588	0,002963106

Tabla de Análisis estadístico de esfuerzo y deformación al 30% paralelo y perpendicular, Fuente: Autores

Las tablas anteriores muestran el análisis de los parámetros probabilísticos de dispersión o probabilidad descriptiva de las pruebas realizadas sobre el material base, se puede inferir que:

1. Siendo la desviación estándar (sigma) la diferencia de los valores a la media esperada, el coeficiente de variación (medida estadística descriptiva que indica lo grande que es la desviación estándar en comparación con la media) es de 61%. Siendo un estadístico que es útil para comparar la dispersión de conjuntos de datos que tienen distintas desviaciones estándar y distintos promedios, permite inferir que los métodos usados de fundición son de importancia crítica, y que los métodos usados en paralelo o perpendicular permiten un amplio margen de posibilidad. Existen otros métodos de fundición industrial con los cuales se puede obtener descriptivas estadísticas más estrechas y por ello los controles de calidad más rigurosos.
2. El error típico en estadística se refiere a las variaciones que son a menudo inevitables. El error típico puede definirse también como la variación producida por factores distorsionantes tanto conocidos como desconocidos. El error típico que arroja la herramienta de Excel usado en los datos de pruebas del material, da un valor menor a 0.6, lo que indica que se ha seguido la metodología correctamente.



3. Al comparar los valores de esfuerzo y deformación dentro los mismos porcentajes entre la forma de fundición paralelo y perpendicular.

**Tabla 15. Análisis de esfuerzo de sigma, rango y porcentaje en paralelo al 0%.**

Medidas	2 $\sigma$	Rango	Porcentaje
<b>Esfuerzo 0%</b>			
<b>Paralelo</b>	82,39231824	133,576704	61,68%
<b>Esfuerzo 0%</b>			
<b>Paralelo</b>	0,0042	0,0074	56,76%
<b>Esfuerzo 0%</b>			
<b>Paralelo</b>	65,51475048	121,625855	53,87%
<b>Esfuerzo 0%</b>			
<b>Paralelo</b>	0,003039998	0,00542708	56,02%

Tabla de análisis de esfuerzo al 0% de sigma, rango y porcentaje en paralelo, Fuente: Autores

**Tabla 16. Análisis de esfuerzo de sigma, rango y porcentaje en paralelo al 10%.**

Medidas	2 $\sigma$	Rango	Porcentaje
<b>Esfuerzo 10%</b>			
<b>Paralelo</b>	76,45978484	129,501641	59,04%
<b>Esfuerzo 10%</b>			
<b>Paralelo</b>	0,003653412	0,00648215	56,36%
<b>Esfuerzo 10%</b>			
<b>Paralelo</b>	65,51475048	108,078471	60,62%
<b>Esfuerzo 10%</b>			
<b>Paralelo</b>	0,002115234	0,00400812	52,77%

Tabla de análisis de esfuerzo al 10 % de sigma, rango y porcentaje en paralelo, Fuente: Autores

**Tabla 17. Análisis de esfuerzo de sigma, rango y porcentaje en paralelo al 20%.**

<b>Medidas</b>	<b>2<math>\sigma</math></b>	<b>Rango</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Esfuerzo 20%</b>			
<b>Paralelo</b>	71,7087126	119,625181	59,94%
<b>Esfuerzo 20%</b>			
<b>Paralelo</b>	0,002053518	0,00369035	55,65%
<b>Esfuerzo 20%</b>			
<b>Paralelo</b>	62,11872404	104,337665	59,54%
<b>Esfuerzo 20%</b>			
<b>Paralelo</b>	0,001822844	0,00327527	55,65%

Tabla de análisis de esfuerzo al 20% de sigma, rango y porcentaje en paralelo, Fuente: Autores

**Tabla 18. Análisis de esfuerzo de sigma, rango y porcentaje en paralelo al 30%.**

<b>Medidas</b>	<b>2<math>\sigma</math></b>	<b>Rango</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Esfuerzo 30%</b>			
<b>Paralelo</b>	51,82742676	92,1764448	56,23%
<b>Esfuerzo 30%</b>			
<b>Paralelo</b>	0,001334688	0,002548	52,38%
<b>Esfuerzo 30%</b>			
<b>Paralelo</b>	71,33986872	119,183967	59,86%
<b>Esfuerzo 30%</b>			
<b>Paralelo</b>	0,001634018	0,00295782	55,24%

Tabla de análisis de esfuerzo al 30% de sigma, rango y porcentaje en paralelo, Fuente: Autores

#### 2.2.4. Ductilidad del material

Para el siguiente análisis de ductilidad de las probetas obtenidas tenemos los siguientes valores que estarán reflejada en la tabla.

Se entiende por Dúctil al hecho de que un material pueda convertir en cables o hilos, por lo que tiene capacidad para estirarse. Otra forma de interpretarla es la presencia de una región plástica significativa en la curva de esfuerzo-deformación antes de la fractura. Frágil es lo contrario a dúctil. La ausencia de cualquier rango plástico antes de fractura o la falta de un punto de fluencia claramente definido. En definitiva, en el sector de la metalurgia se entiende por ‘metal dúctil’ aquel que sufre grandes deformaciones antes de romperse, y el ‘metal frágil’ el opuesto, es decir que se rompe sin apenas deformación. Los datos obtenidos en los ensayos a tracción se pueden utilizar para comparar distintos materiales y comprobar si algunos de ellos podrán resistir los esfuerzos a los que va a estar sometido cuando es utilizado en una determinada aplicación

La ductilidad puede medirse de dos formas:

Midiendo el porcentaje de elongación, el cual se define de la siguiente manera:

$$\% \text{ de elongacion} = (\%EL) = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100$$

Midiendo el porcentaje de reducción de área, definiéndose de la siguiente manera:

$$\% \text{ de reduccion de area} = (\%AR) = \frac{A_f - A_0}{A_0} \times 100$$

Una idea cualitativa de la ductilidad de un material puede lograrse al visualizar la longitud de la curva esfuerzo deformación unitaria de la dirección del eje  $\epsilon$ .

**Tabla 19. Valores obtenidos del programa para el material base a 0% de AA7075 en paralelo**

**Material base al 0% de AA7075 en paralelo.**

	<b>Lo (mm)</b>	<b>Lf(mm)</b>	<b>EL</b>	<b>%EL</b>
<b>Probeta 1</b>	160	161,536	0,0096	0,96
<b>Probeta 2</b>	160	161,312	0,0082	0,82
<b>Probeta 3</b>	160	161,2	0,0075	0,75
<b>Probeta 4</b>	160	161,024	0,0064	0,64
<b>Probeta 5</b>	160	160,944	0,0059	0,59
			<b>PROMEDIO</b>	<b>0,752</b>

Tabla de Valores obtenidos para el análisis de ductilidad en el material base a 0% de AA7075 en paralelo,

Fuente: Autores

De la tabla anterior se puede observar el promedio obtenido de las cinco probetas del material base realizados en fundición paralelo nos da un 75% de elongación eso quiere decir que tiene una buena ductilidad.

**Tabla 20. Valores obtenidos del programa para el material base a 0% de AA7075 en perpendicular.**

**Material base al 0% de AA7075 en perpendicular.**

	<b>Lo (mm)</b>	<b>Lf(mm)</b>	<b>EL</b>	<b>%EL</b>
<b>Probeta 1</b>	160	160,896	0,0056	0,56
<b>Probeta 2</b>	160	160,88	0,0055	0,55
<b>Probeta 3</b>	160	160,944	0,0059	0,59
<b>Probeta 4</b>	160	160,912	0,0057	0,57
<b>Probeta 5</b>	160	160,624	0,0039	0,39
			<b>PROMEDIO</b>	<b>0,532</b>

Tabla de Valores obtenidos para el análisis de ductilidad en el material base a 0% de AA7075 en

perpendicular, Fuente: Autores

Como se muestra en la tabla el promedio obtenido de las cinco probetas del material base realizados en fundición perpendicular nos da un 53% de elongación eso quiere decir que tiene una aceptable ductilidad.

**Tabla 21. Valores obtenidos del programa con 10% reciclado del material de AA7075 en paralelo.**

**Aluminio con 10% reciclado en paralelo**

	<b>Lo (mm)</b>	<b>Lf(mm)</b>	<b>EL</b>	<b>%EL</b>
<b>Probeta 1</b>	160	160,896	0,0056	0,56
<b>Probeta 2</b>	160	161,296	0,0081	0,81
<b>Probeta 3</b>	160	161,216	0,0076	0,76
<b>Probeta 4</b>	160	160,752	0,0047	0,47
<b>Probeta 5</b>	160	160,864	0,0054	0,54
			<b>PROMEDIO</b>	<b>0,628</b>

Tabla de valores obtenidos para el análisis de ductilidad en el material base a 10% de AA7075 en paralelo,

Fuente: Autores

Se observa en tabla el promedio obtenido de las cinco probetas del material base realizados en fundición paralelo nos da un 62% de elongación eso quiere decir que tiene una aceptable ductilidad.

**Tabla 22. Valores obtenidos del programa con 10% reciclado del material de AA7075 en perpendicular.**

**Aluminio con 10% reciclado en perpendicular**

	<b>Lo (mm)</b>	<b>Lf(mm)</b>	<b>EL</b>	<b>%EL</b>
<b>Probeta 1</b>	160	160,688	0,0043	0,43
<b>Probeta 2</b>	160	160,592	0,0037	0,37
<b>Probeta 3</b>	160	160,704	0,0044	0,44
<b>Probeta 4</b>	160	160,608	0,0038	0,38
<b>Probeta 5</b>	160	160,672	0,0042	0,42
			<b>PROMEDIO</b>	<b>0,408</b>

Tabla de valores obtenidos para el análisis de ductilidad en el material base a 10% de AA7075 en

perpendicular, Fuente: Autores

Como se observa en tabla el promedio obtenido de las cinco probetas del material base realizados en fundición perpendicular nos da un 40% de elongación eso quiere decir que tiene una mala ductilidad.

**Tabla 23. Valores obtenidos del programa con 20% reciclado del material de AA7075 en paralelo.**

**Aluminio con 20% reciclado en paralelo**

	<b>Lo (mm)</b>	<b>Lf(mm)</b>	<b>EL</b>	<b>%EL</b>
<b>Probeta 1</b>	160	160,656	0,0041	0,41
<b>Probeta 2</b>	160	160,496	0,0031	0,31
<b>Probeta 3</b>	160	160,624	0,0039	0,39
<b>Probeta 4</b>	160	160,432	0,0027	0,27
<b>Probeta 5</b>	160	160,448	0,0028	0,28
			<b>PROMEDIO</b>	<b>0,332</b>

Tabla de valores obtenidos para el análisis de ductilidad en el aluminio con 20% de AA7075 en paralelo,

Fuente: Autores

De la tabla anterior se puede observar el promedio obtenido de las cinco probetas del material base realizados en fundición paralelo nos da un 33% de elongación eso quiere decir que tiene una mala ductilidad.

**Tabla 24.. Valores obtenidos del programa con 20% reciclado del material de AA7075 en perpendicular.**

**Aluminio con 20% reciclado en perpendicular**

	<b>Lo (mm)</b>	<b>Lf(mm)</b>	<b>EL</b>	<b>%EL</b>
<b>Probeta 1</b>	160	160,496	0,0031	0,31
<b>Probeta 2</b>	160	160,448	0,0028	0,28
<b>Probeta 3</b>	160	160,544	0,0034	0,34
<b>Probeta 4</b>	160	160,608	0,0038	0,38
<b>Probeta 5</b>	160	160,576	0,0036	0,36
			<b>PROMEDIO</b>	<b>0,334</b>

Tabla de valores obtenidos para el análisis de ductilidad en el aluminio con 20% de AA7075 en perpendicular, Fuente: Autores

Como se observa en tabla el promedio obtenido de las cinco probetas del material base realizados en fundición paralelo nos da un 33% de elongación eso quiere decir que tiene una mala ductilidad.

**Tabla 25. Valores obtenidos del programa con 30% reciclado del material de AA7075 en paralelo.**

**Aluminio con 30% reciclado en paralelo**

	<b>Lo (mm)</b>	<b>Lf(mm)</b>	<b>EL</b>	<b>%EL</b>
<b>Probeta 1</b>	160	160,336	0,0021	0,21
<b>Probeta 2</b>	160	160,4	0,0025	0,25
<b>Probeta 3</b>	160	160,416	0,0026	0,26
<b>Probeta 4</b>	160	160,448	0,0028	0,28
<b>Probeta 5</b>	160	160,432	0,0027	0,27
			<b>PROMEDIO</b>	<b>0,254</b>

Tabla de valores obtenidos para el análisis de ductilidad en el aluminio con 30% de AA7075 en paralelo,

Fuente: Autores

De la tabla anterior se puede observar el promedio obtenido de las cinco probetas del material base realizados en fundición paralelo nos da un 25% de elongación eso quiere decir que tiene una mala ductilidad.

**Tabla 26. Valores obtenidos del programa con 30% reciclado del material de AA7075 en perpendicular.**

**Aluminio con 30% reciclado en perpendicular**

	<b>Lo (mm)</b>	<b>Lf(mm)</b>	<b>EL</b>	<b>%EL</b>
<b>Probeta 1</b>	160	160,384	0,0024	0,24
<b>Probeta 2</b>	160	160,352	0,0022	0,22
<b>Probeta 3</b>	160	160,352	0,0022	0,22
<b>Probeta 4</b>	160	160,416	0,0026	0,26
<b>Probeta 5</b>	160	160,448	0,0028	0,28
			<b>PROMEDIO</b>	<b>0,244</b>

Tabla de valores obtenidos para el análisis de ductilidad en el aluminio con 30% de AA7075 en perpendicular, Fuente: Autores

Como se observa en tabla el promedio obtenido de las cinco probetas del material base realizados en fundición paralelo nos da un 24% de elongación eso quiere decir que tiene una mala ductilidad.



## CAPITULO III

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

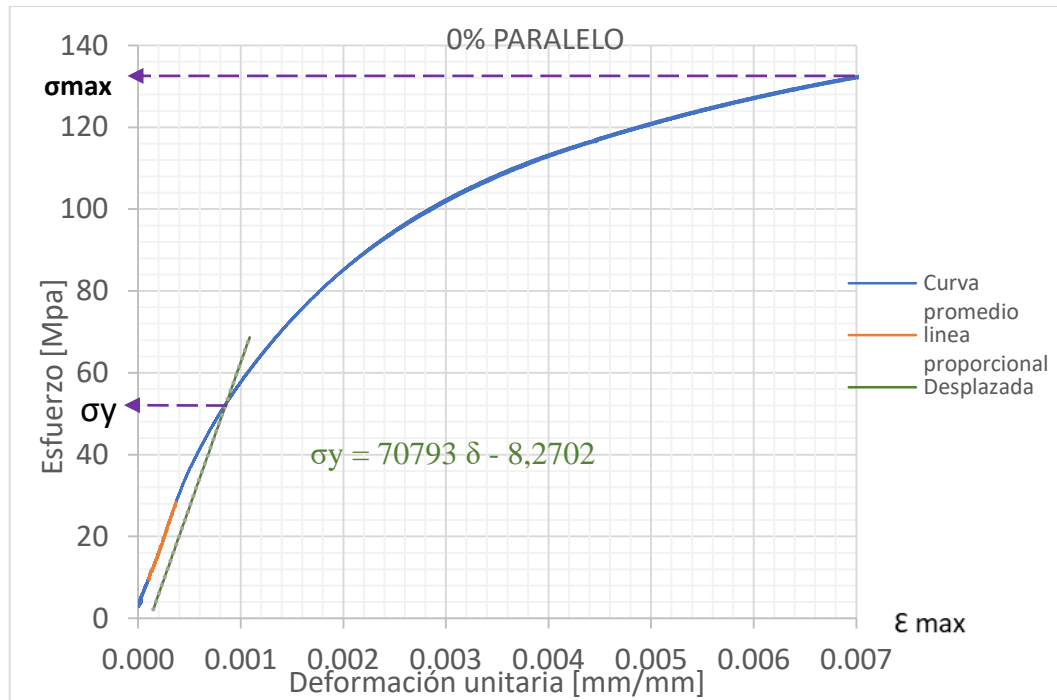
#### 3.1. Análisis de resultados obtenidos en ensayos a tracción

El presente capítulo se enfoca en análisis de los resultados obtenidos en los ensayos a tracción en probetas de aluminio dulce fundido con porcentajes de aleación de aluminio AA7075 reciclado en forma de virutas en porcentajes de 0, 10, 20 y 30% con relación al peso. Se realizará un análisis análogo con gráficas de dispersión del promedio de las cinco muestras por cada experimento y se determinará cuál es la influencia de las propiedades mecánicas del esfuerzo máximo, esfuerzo a la fluencia, módulo de elasticidad y deformación unitaria en función de los porcentajes de material reciclado AA7075 en la fundición con aluminio dulce. Además, se comparará entre los resultados de la fundición paralela con la fundición perpendicular y determinar, que dirección brinda mejores propiedades mecánicas a tracción.

#### 3.2. Análisis del material base

##### 3.2.1. Material base al 0% de AA7075 en paralelo.

La figura 34 muestra el diagrama esfuerzo vs deformación unitaria del resultado promedio de las cinco probetas ensayadas con el 0% de AA7075 reciclado en paralelo.



**Figura 35.** Diagrama esfuerzo vs deformación del material base en paralelo. Como muestra la figura anterior, se generó una línea de color naranja con los datos que se encuentran en la proporcionalidad de la curva y se determina el módulo de Young E. Además, se traza una paralela desplazada al 0,2% de la deformación total

**Tabla 27. Esfuerzos y deformaciones al 0 % paralelo**

ESF MAX	133,6
DEF MAX	0,0074
DESPLZAMIENTO AL 0,2%	0,0001472

Se presenta la tendencia lineal de la paralela de color verde, se obtiene la ecuación lineal de la pendiente y del cruce con la curva se determina el límite de fluencia.

$$\sigma_y = 70793 \delta - 8,2702$$

$$\sigma_y = 70793 (0,000847) - 8,2702$$

$$\sigma_y = 51,7 \text{ MPa}$$

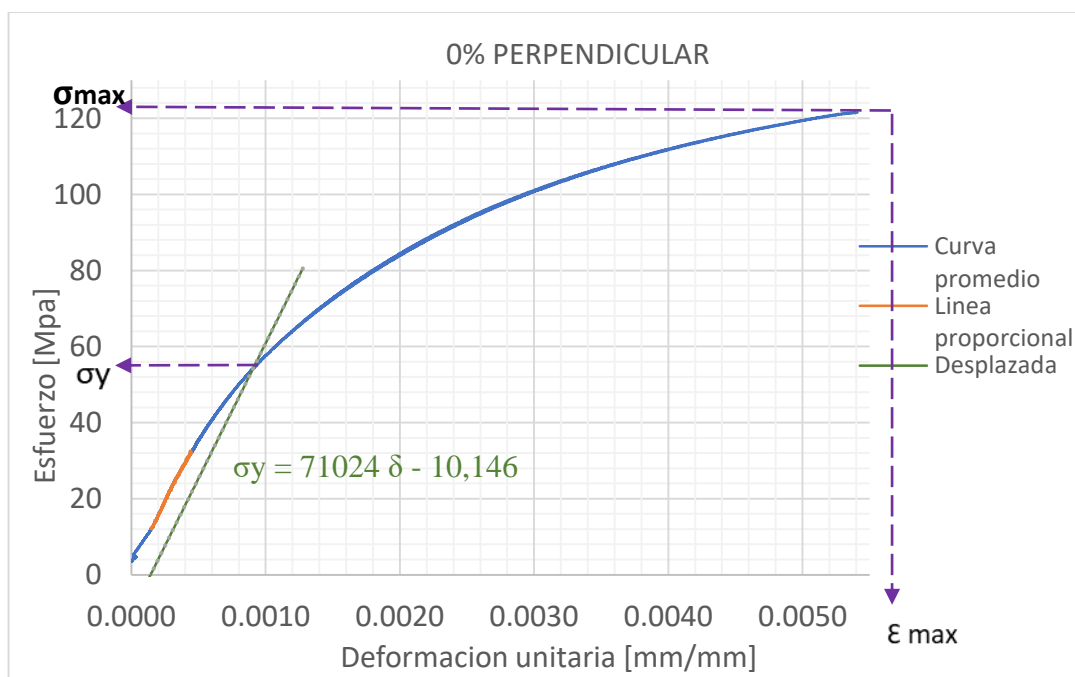
**Tabla 11.** Indica los valores de las propiedades mecánicas que se encuentran en el diagrama esfuerzo vs deformación del material base en paralelo.

**Tabla 28. Propiedades mecánicas del material base en Paralelo y 0% de reciclado.**

Esfuerzo [MPa]	Máx.	Límite de Fluencia [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Def unitaria Máx. [mm/mm]
133,6		52	80,5	0,0074

**3.2.2. Material base al 0% de AA7075 en perpendicular.**

La figura 35 muestra el diagrama esfuerzo vs deformación unitaria del resultado promedio de las cinco probetas ensayadas con el 0% de AA7075 reciclado en perpendicular.



**Figura 36.** Diagrama esfuerzo vs deformación del material base en perpendicular

**Tabla 29. Esfuerzos y deformaciones al 0 % perpendicular**

ESF MAX	121,6
DEF MAX	0,0054
0,2%	0,00010854

Se realiza el mismo procedimiento anterior para encontrar la línea de tendencia y en este caso presenta la ecuación lineal de la pendiente:

$$\sigma_y = 71024 (0,000889) + 10,146$$

$$\sigma_y = 52,99 \text{ MPa}$$

La tabla 27 muestra los resultados de las propiedades mecánicas que se encontraron en el diagrama esfuerzo vs deformación del material base en perpendicular.

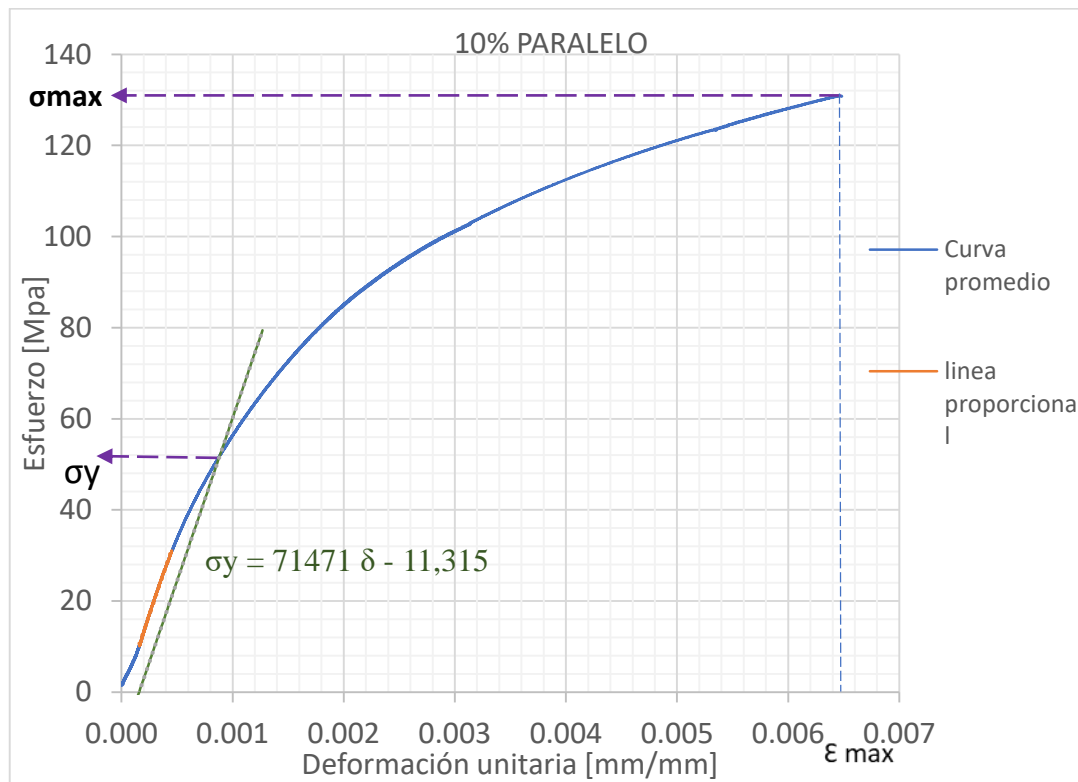
**Tabla 30. Propiedades mecánicas del material base en Perpendicular y 0% de reciclado.**

Esfuerzo [MPa]	Máx.	Límite de Fluencia [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Def unitaria Máx. [mm/mm]
121,6		53	76	0,0054

### 3.3. Análisis del material al 10% de AA7075 reciclado.

#### 3.3.1. Material con 10% de AA7075 en paralelo.

La figura 36 muestra el diagrama esfuerzo vs deformación unitaria del resultado promedio de las cinco probetas ensayadas con el 10% de AA7075 reciclado en paralelo.



**Figura 37.** Diagrama esfuerzo vs deformación del material al 10% en paralelo

**Tabla 31. Esfuerzos y deformaciones al 10 % paralela**

ESF MAX	130,9
DEF MAX	0,0065
0,2%	0,000129685

Del diagrama se genera también la tendencia lineal y presenta la ecuación lineal de la pendiente:

$$\sigma_y = 71471 (0,000870) - 11,315$$

$$\sigma_y = 50,8 \text{ MPa}$$

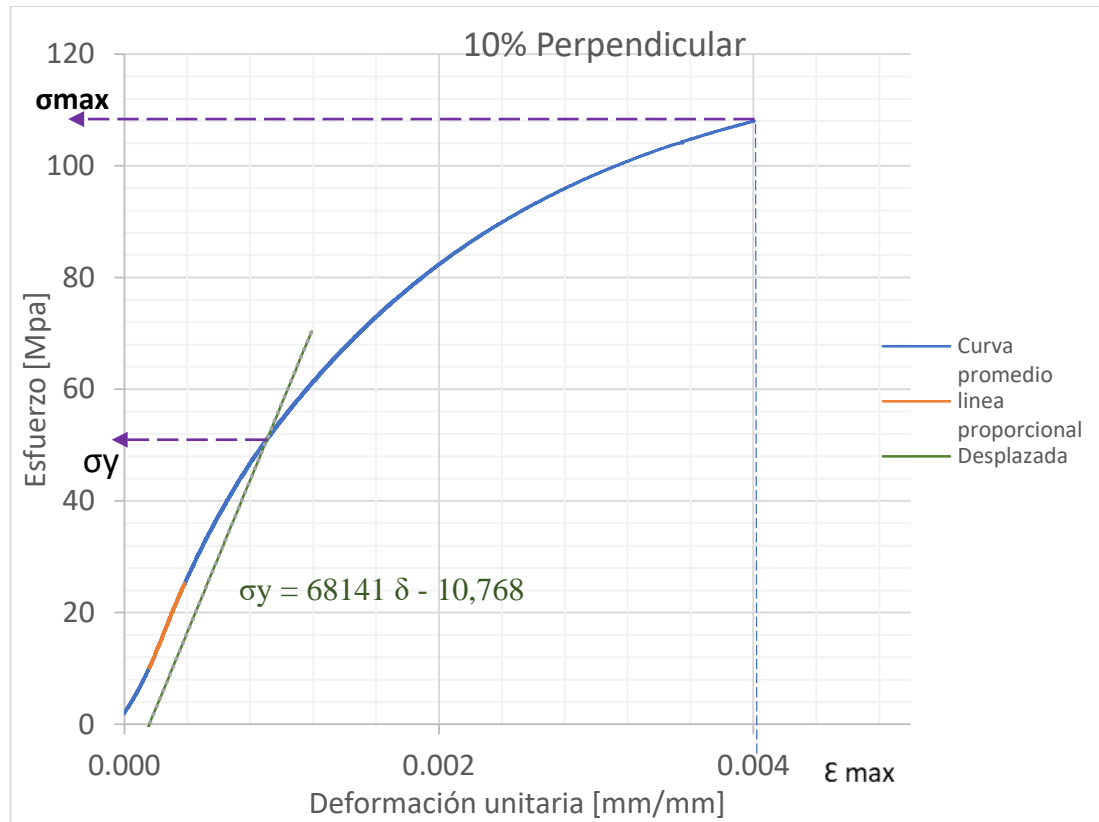
La tabla 27 muestra los resultados de las propiedades mecánicas que se encontraron en el diagrama esfuerzo vs deformación del material al 10% de AA7075 en paralelo.

**Tabla 32. Propiedades mecánicas del material en paralelo y 10% de reciclado.**

<b>Esfuerzo</b> <b>[MPa]</b>	<b>Máx. Límite de Fluencia</b> <b>[MPa]</b>	<b>Módulo de Young</b> <b>[GPa]</b>	<b>Def unitaria Máx.</b> <b>[mm/mm]</b>
130,9	51	68	0,0065

### 3.3.2. Material con 10% de AA7075 en perpendicular.

La figura 37 muestra el diagrama esfuerzo vs deformación unitaria del resultado promedio de las cinco probetas ensayadas con el 10% de AA7075 reciclado en perpendicular.



**Figura 38.** Diagrama esfuerzo vs deformación del material al 10% en perpendicular

**Tabla 33.. Esfuerzos y deformaciones al 10 % perpendicular**

ESF MAX	108,1
DEF MAX	0,0040
0,2%	0,000080

La tendencia lineal en la proporcionalidad de la curva presenta la ecuación lineal de la pendiente:

$$y = 68141 (0,000900) - 10,768$$

$$\sigma_y = 50,57 \text{ MPa}$$

La tabla 28 muestra los resultados de las propiedades mecánicas que se encontraron en el diagrama esfuerzo vs deformación del material al 10% de AA7075 en perpendicular.

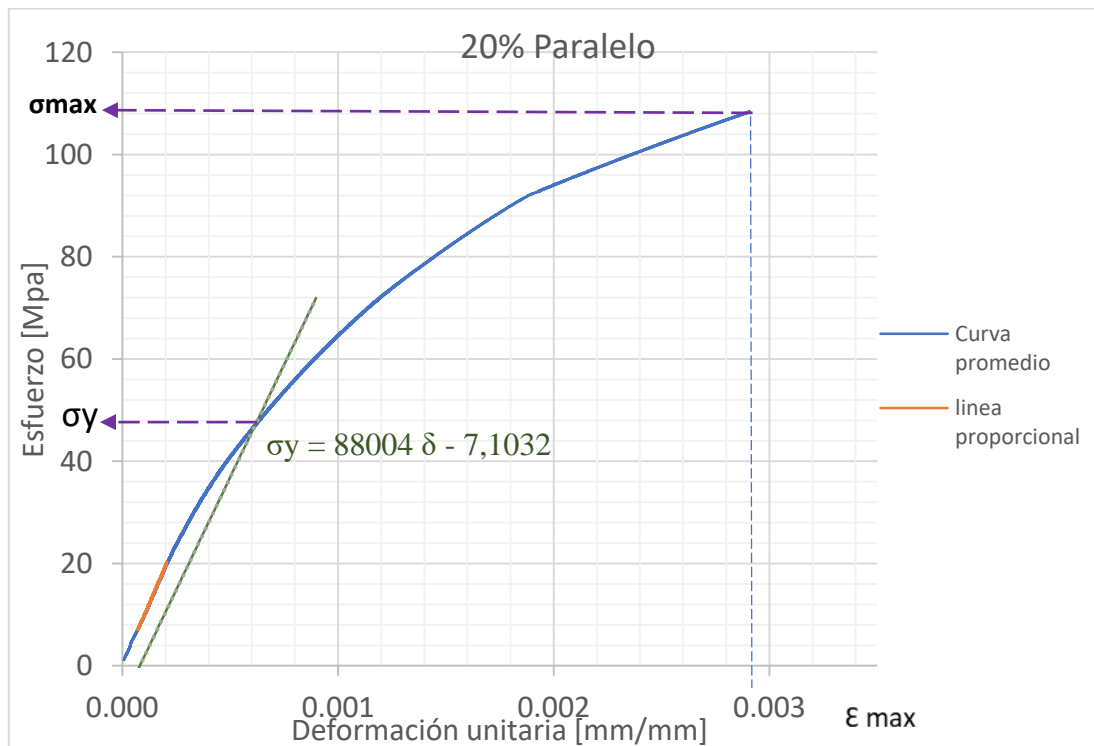
**Tabla 34. Propiedades mecánicas del material en perpendicular y 10% de reciclado.**

Esfuerzo [MPa]	Máx. Límite de Fluencia [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Def unitaria Máx. [mm/mm]
108,1	51	65	0,0040

### 3.4. Análisis del material al 20% de AA7075 reciclado.

#### 3.4.1. Material con 20% de AA7075 en paralelo.

La figura 38 muestra el diagrama esfuerzo vs deformación unitaria del resultado promedio de las cinco probetas ensayadas con el 20% de AA7075 reciclado en paralelo.



**Figura 39.** Diagrama esfuerzo vs deformación del material al 20% en paralelo

**Tabla 35. Esfuerzos y deformaciones al 20 % paralelo.**

ESF MAX	108,6
---------	-------

DEF MAX	0,0029
0,2%	0,000058

---

La tendencia lineal en la proporcionalidad de la curva presenta la ecuación lineal de la pendiente:

$$\sigma_y = 88004 (0,000628) + 7,1032$$

$$\sigma_y = 48,18 \text{ MPa}$$

La tabla 29 muestra los resultados de las propiedades mecánicas que se encontraron en el diagrama esfuerzo vs deformación del material al 20% de AA7075 en paralelo.

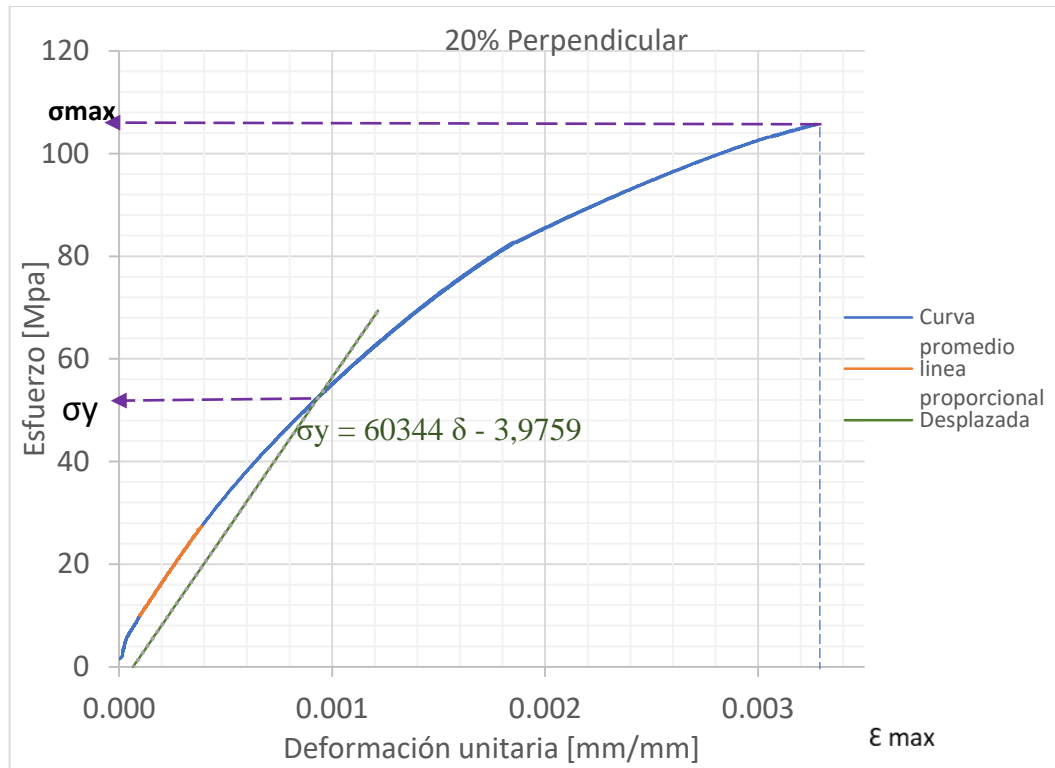
**Tabla 36. Propiedades mecánicas del material en paralelo y 20% de reciclado.**

<b>Esfuerzo</b> [MPa]	<b>Máx. Límite de Fluencia</b> [MPa]	<b>Módulo de Young</b> [GPa]	<b>Def unitaria Máx.</b> [mm/mm]
108,6	48,2	97	0,0033

#### **3.4.2. Material con 20% de AA7075 en perpendicular.**

La figura 39 indica el diagrama esfuerzo vs deformación unitaria del resultado promedio de las cinco probetas ensayadas con el 20% de AA7075 reciclado en perpendicular.





**Figura 40.** Diagrama esfuerzo vs deformación del material al 20% en perpendicular

**Tabla 37. Esfuerzos y deformaciones al 20 % perpendicular**

ESF MAX	105,8
DEF MAX	0,0033
0,2%	0,000066

La tendencia lineal en la proporcionalidad de la curva presenta la ecuación lineal de la pendiente:

$$\sigma_y = 60344 (0,000916) - 3,9759$$

$$\sigma_y = 51,2 \text{ MPa}$$

La tabla 30 revela los resultados de las propiedades mecánicas que se encontraron en el diagrama esfuerzo vs deformación del material al 20% de AA7075 en perpendicular.

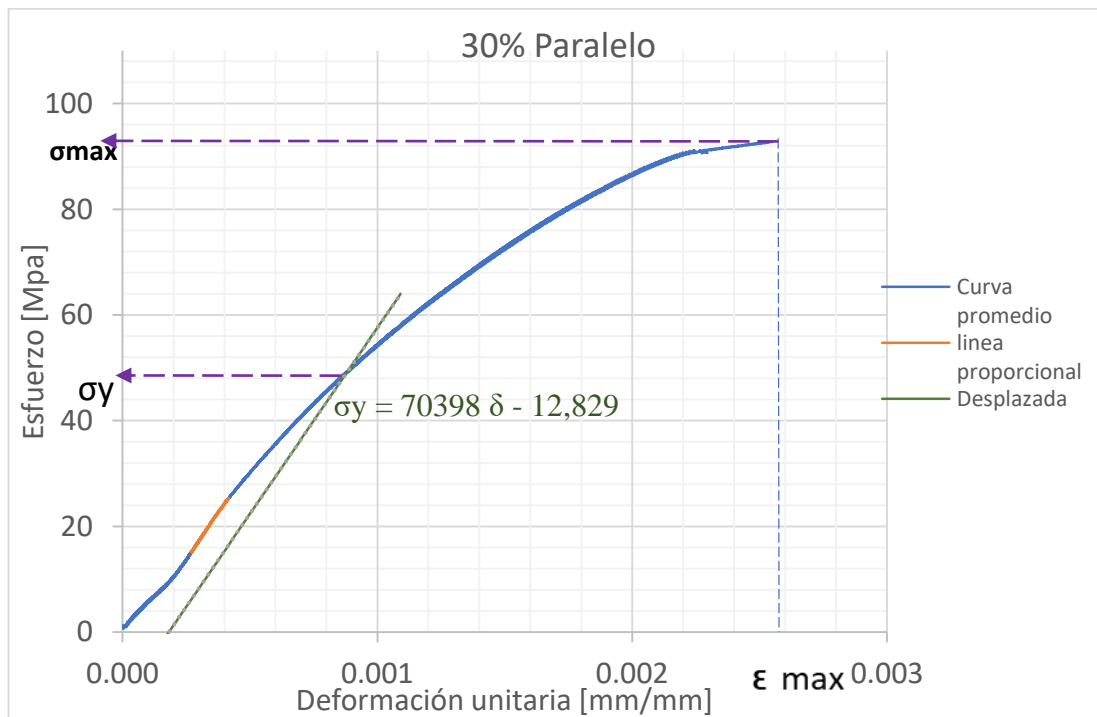
**Tabla 38. Propiedades mecánicas del material en perpendicular y 20% de reciclado.**

Esfuerzo [MPa]	Máx. Límite de Fluencia [MPa]	Módulo de Young [GPa]	Def unitaria Máx. [mm/mm]
105,8	51,2	80	0,0033

**3.5. Análisis del material al 30% de AA7075 reciclado.**

**3.5.1. Material con 30% de AA7075 en paralelo.**

La figura 40 muestra el diagrama esfuerzo vs deformación unitaria del resultado promedio de las cinco probetas ensayadas con el 30% de AA7075 reciclado en paralelo.



**Figura 41.** Diagrama esfuerzo vs deformación del material al 30% en paralela

**Tabla 39. Esfuerzos y deformaciones al 0 % perpendicular**

ESF MAX	92,9
DEF MAX	0,0025
0,2%	0,000051

La tendencia lineal en la parte proporcional de la curva presenta la ecuación lineal de la pendiente:

$$\sigma_y = 70398 (0,000881) - 12,829$$

$$\sigma_y = 49,2 \text{ MPa}$$

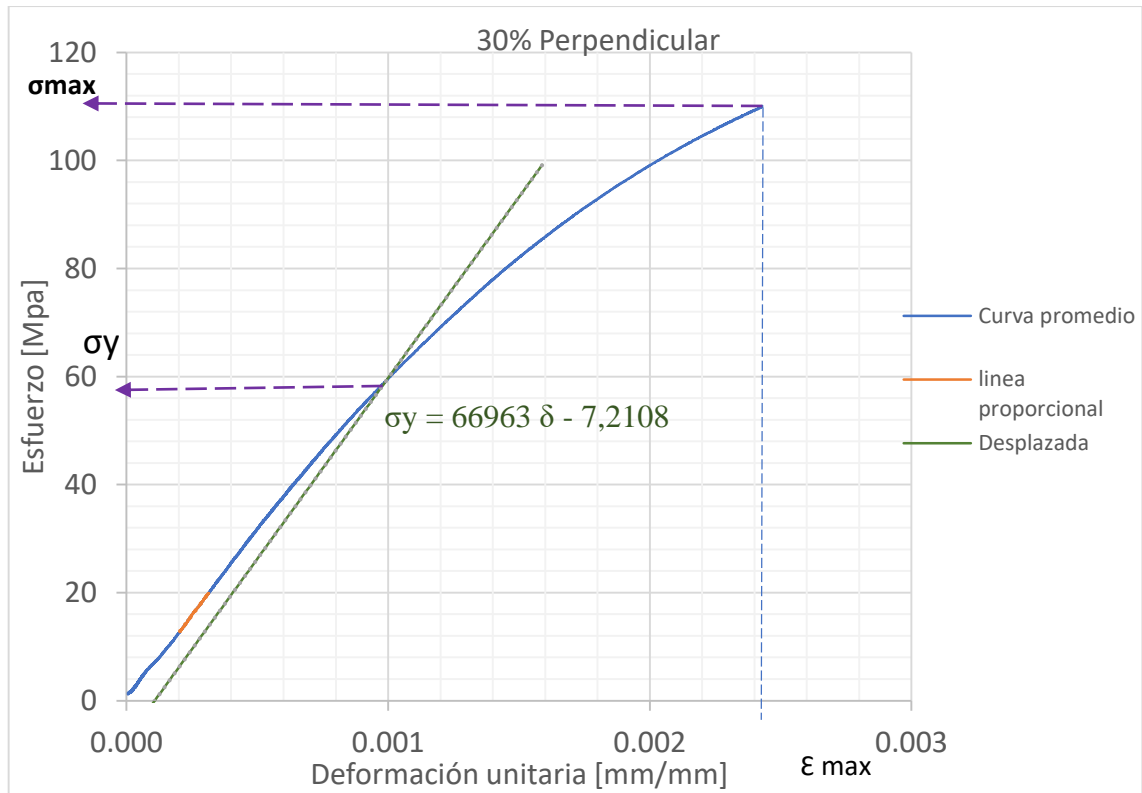
La tabla 31 revela los resultados de las propiedades mecánicas que se encontraron en el diagrama esfuerzo vs deformación del material al 30% de AA7075 en paralelo.

**Tabla 40. Propiedades mecánicas del material en paralelo y 30% de reciclado.**

<b>Esfuerzo</b> <b>[MPa]</b>	<b>Máx. Límite de Fluencia</b> <b>[MPa]</b>	<b>Módulo de Young</b> <b>[GPa]</b>	<b>Def unitaria Máx.</b> <b>[mm/mm]</b>
93	49,2	60	0,0025

### 3.5.2. Material con 30% de AA7075 en perpendicular.

La figura 41 indica el diagrama esfuerzo vs deformación unitaria del resultado promedio de las cinco probetas ensayadas con el 30% de AA7075 reciclado en perpendicular.



**Figura 42.** Diagrama esfuerzo vs deformación del material al 30% en perpendicular

**Tabla 41. Esfuerzos y deformaciones al 30 % perpendicular**

ESF MAX	110,1
DEF MAX	0,0024
2%	0,000049

La tendencia lineal en la parte proporcional de la curva presenta la ecuación lineal de la pendiente:

$$\sigma_y = 66963 (0,000959) - 7,210$$

$$\sigma_y = 56,9 \text{ MPa}$$

La tabla 32 revela los resultados de las propiedades mecánicas que se encontraron en el diagrama esfuerzo vs deformación del material al 30% de AA7075 en perpendicular.

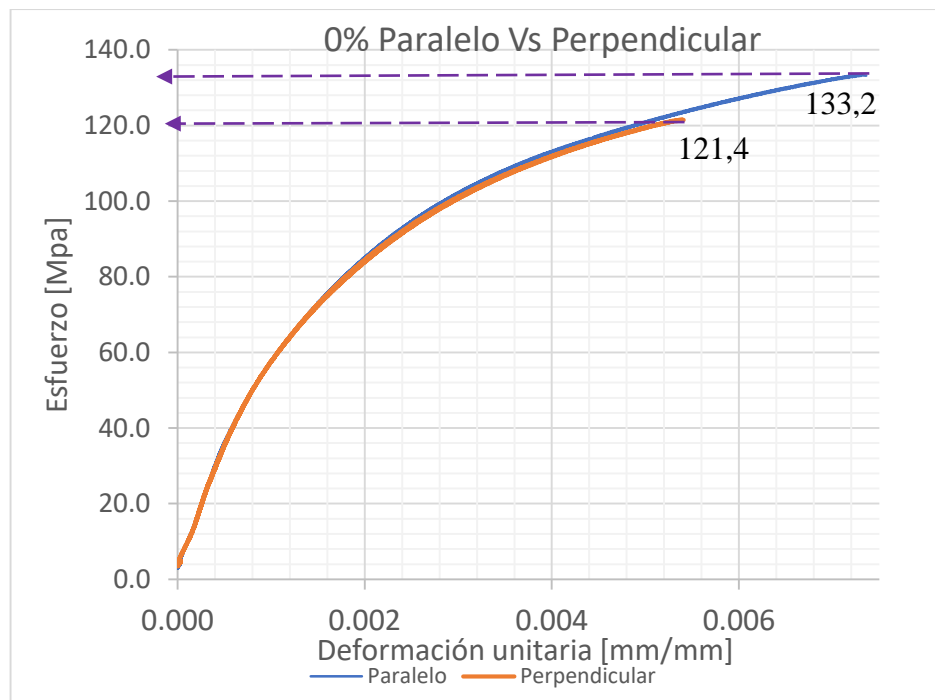
**Tabla 42. Propiedades mecánicas del material en perpendicular y 30% de reciclado.**

<b>Esfuerzo Máx. [MPa]</b>	<b>Límite de Fluencia [MPa]</b>	<b>Módulo de Young [GPa]</b>	<b>Def unitaria Máx. [mm/mm]</b>
110	56,9	63	0,0025

### 3.6. Comparación de las propiedades mecánicas en paralelo y perpendicular

#### 3.6.1. Comparación del material base al 0% de AA7075

Se realiza la comparación de las curvas promedio de esfuerzo vs deformación unitaria de acuerdo con la dirección de la fundición, sea paralela o perpendicular. La figura 42, muestra la comparación con el material base al 0% de AA7075.



**Figura 43.** Comparación entre paralela y perpendicular del material base al 0%.

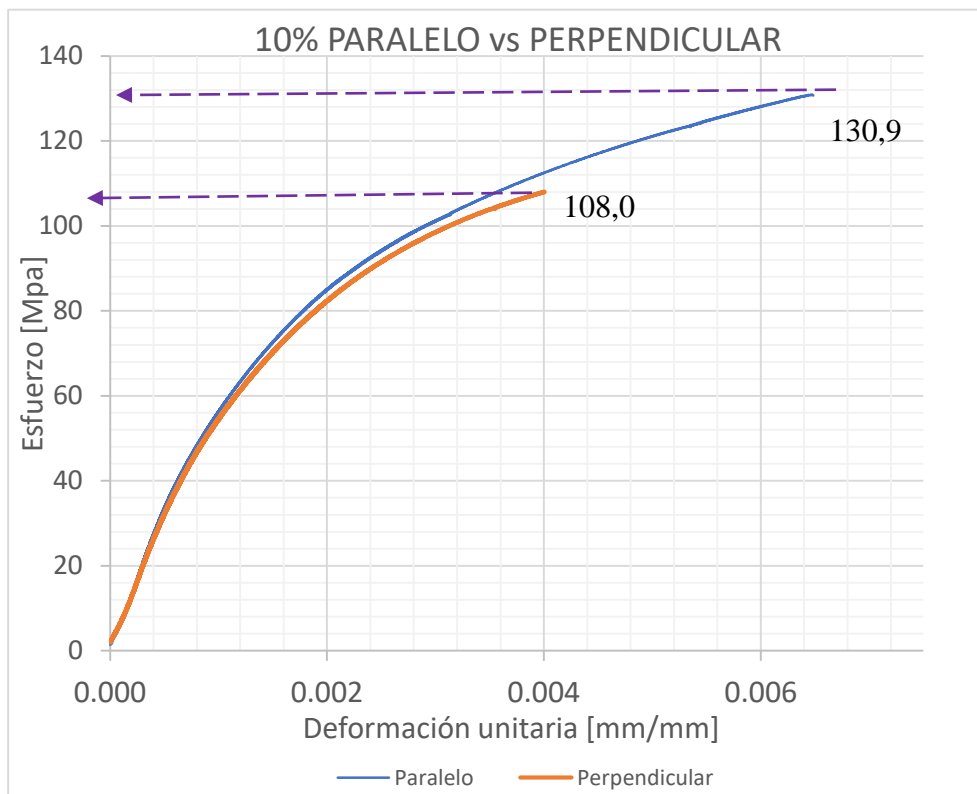
De la figura anterior se puede determinar que la curva no varía en su forma inicial, es decir, sus propiedades iniciales son similares, sin embargo, la resistencia máxima en paralelo es superior con un valor promedio de 133,2 MPa y la resistencia máxima en perpendicular con un valor promedio es de 121,4 MPa. La tabla 33, muestra las diferencias porcentuales en cuanto a resistencia máxima.

**Tabla 43. Porcentaje de diferencia entre el mejor resultado y el de menor valor.**

Resultado de menor valor		Mejor resultado			
Dirección	$\sigma_{Max}$	[MPa]	Dirección	$\sigma_{Max}$	Diferencia
				[MPa]	[%]
Perpendicular	121,4		Paralelo	133,2	9%

### 3.6.2. Comparación del material al 10% de AA7075

La figura 43, muestra la comparación entre paralelo y perpendicular de las curvas promedio de esfuerzo vs deformación unitaria con el material al 10% de AA7075. En este diagrama se aprecia una pérdida de resistencia en perpendicular.



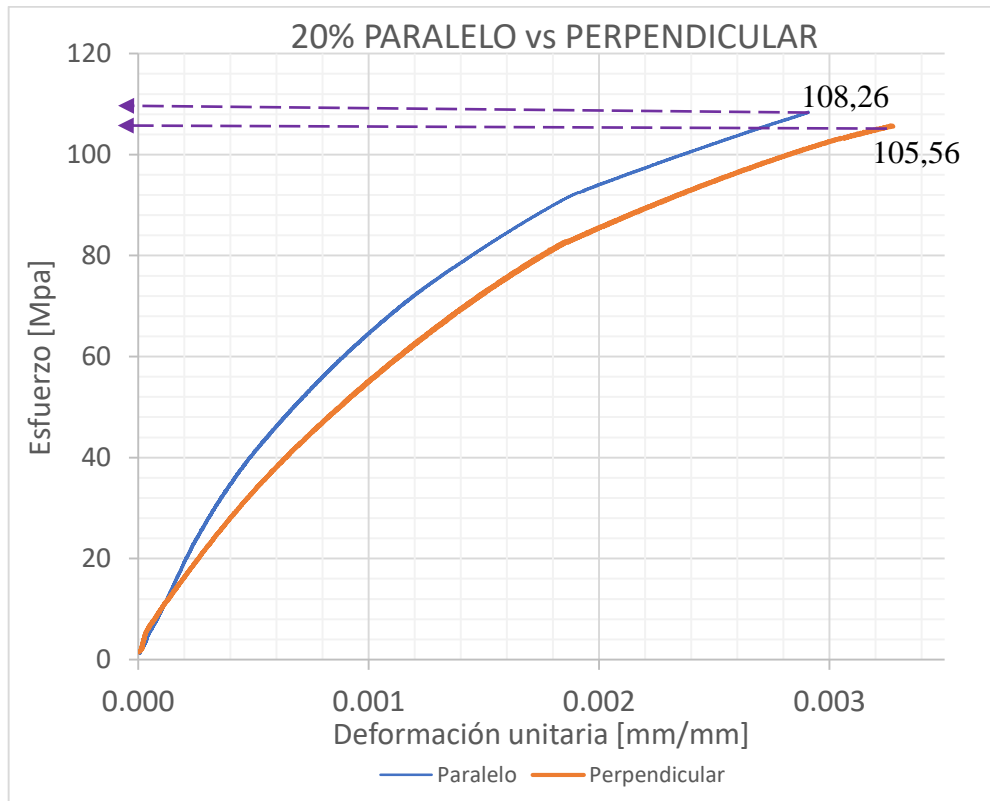
**Figura 44.** Comparación entre paralela y perpendicular del material al 10% de AA7075. La tabla 34, muestra las diferencias porcentuales en cuanto a resistencia máxima del mejor resultado con relación al de menor resultado.

**Tabla 44. Porcentaje de diferencia entre el mejor resultado y el de menor valor.**

Resultado de menor valor		Mejor resultado			
Dirección	$\sigma_{Max}$	[MPa]	Dirección	$\sigma_{Max}$	Diferencia
				[MPa]	[%]
Perpendicular	108		Paralelo	131	17,5%

### 3.6.3. Comparación del material al 20% de AA7075

La figura 44, muestra la comparación entre paralelo y perpendicular de las curvas promedio de esfuerzo vs deformación unitaria con el material al 20% de AA7075. En este diagrama se aprecia una pérdida de resistencia en paralelo, con respecto al anterior.



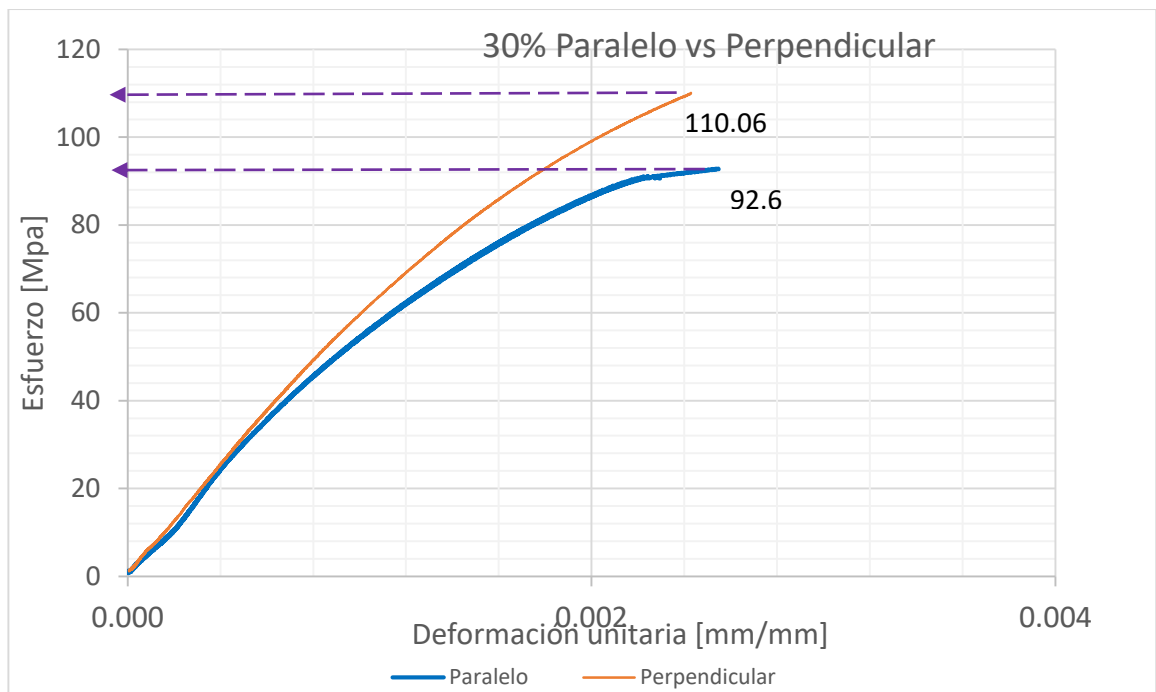
**Figura 45.** Comparación entre paralela y perpendicular del material al 20% de AA7075. La tabla 45, muestra las diferencias porcentuales en cuanto a resistencia máxima del mejor resultado con relación al de menor resultado.

**Tabla 45. Porcentaje de diferencia entre el mejor resultado y el de menor valor.**

Resultado de menor valor		Mejor resultado		
Dirección	$\sigma_{Max}$ [MPa]	Dirección	$\sigma_{Max}$ [MPa]	Diferencia [%]
Perpendicular	106	Paralelo	108	1,9%

### 3.6.4. Comparación del material al 30% de AA7075

La figura 45, muestra la comparación entre paralelo y perpendicular de las curvas promedio de esfuerzo vs deformación unitaria con el material al 30% de AA7075. En este diagrama se aprecia una pérdida de resistencia en paralelo, con respecto al anterior, es decir, la inclusión de material reciclado afecta en la dirección paralelo, sin embargo, la dirección perpendicular no afecta significativamente en relación a la resistencia.



**Figura 46.** Comparación entre paralela y perpendicular del material al 30% de AA7075.

La tabla 46, muestra las diferencias porcentuales en cuanto a resistencia máxima del mejor resultado con relación al de menor resultado.

**Tabla 46. Porcentaje de diferencia entre el mejor resultado y el de menor valor.**

Resultado de menor valor	Mejor resultado
--------------------------	-----------------

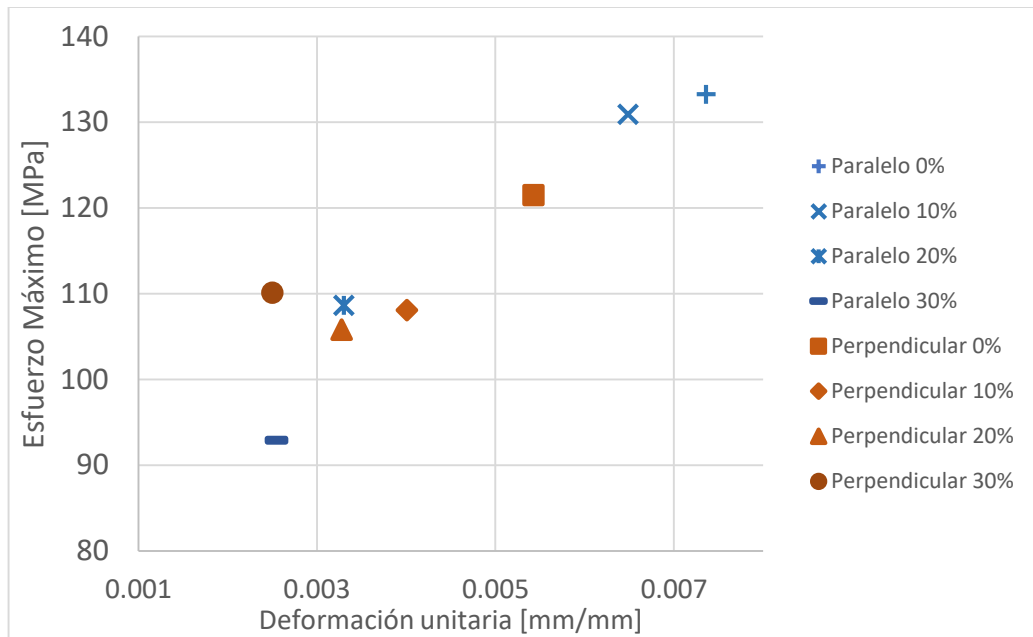


Dirección	$\sigma_{Max}$ [MPa]	Dirección	$\sigma_{Max}$ [MPa]	Diferencia [%]
Paralelo	93	Perpendicular	110	15%

### 3.7. Comparación de las propiedades mecánicas en todo porcentaje y dirección

#### 3.7.1. Comparación de esfuerzo máximo y deformación unitaria máxima.

Para determinar la influencia del esfuerzo máximo y la deformación unitaria máxima con respecto al porcentaje de material reciclado fundido y la dirección paralelo o perpendicular, se realiza un diagrama de dispersión X-Y, donde, para el eje X los valores correspondientes a la deformación unitaria y para el eje Y los valores correspondientes al esfuerzo máximo, como se ve en la figura 46.



**Figura 47.** Comparación de esfuerzo vs deformación máxima de las distintas fundiciones.

De la figura anterior se puede apreciar el resultado que presenta mayor esfuerzo y la mayor deformación unitaria, el valor pertenece al material base con dirección paralelo y el menor resultado de esfuerzo y deformación es de paralelo con el 30% de material reciclado, la pérdida de estas propiedades es gradual a medida que aumenta el porcentaje de material reciclado. La tabla 47, muestra las diferencias porcentuales en cuanto a resistencia máxima del mejor resultado con relación al de menor resultado.

**Tabla 47. Porcentaje de diferencia total entre el máximo esfuerzo y el de menor valor.**

Resultado de menor valor			Mejor resultado		
Dirección	$\sigma_{Max}$	[MPa]	Dirección	$\sigma_{Max}$	Diferencia
				[MPa]	[%]
Paralelo 30%	93		Paralelo 0%	133	30%

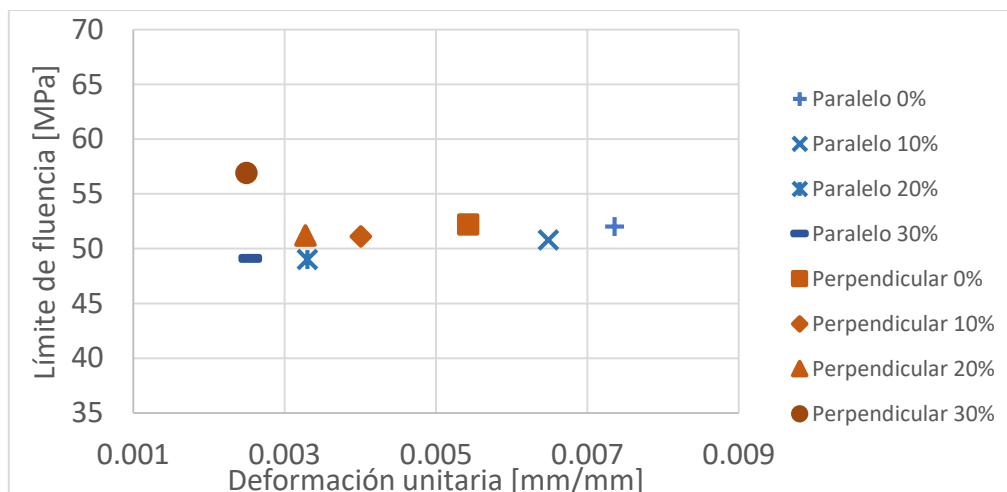
También la deformación unitaria ha disminuido drásticamente cuando la dirección de fundición es en paralelo y el porcentaje de reciclado ha aumentado. La tabla 24, muestra las diferencias porcentuales en cuanto a deformación máxima con relación al de menor resultado.

**Tabla 48. Porcentaje de diferencia total entre la deformación máxima y la de menor valor.**

Resultado de menor valor			Mejor resultado		
Dirección	$\delta$	[mm/mm]	Dirección	$\delta$	Diferencia
				[mm/mm]	[%]
Paralelo 30%	0.0025		Paralelo 0%	0.0074	66%

### 3.7.2. Comparación de límite de fluencia y deformación máxima.

Para determinar la influencia del límite de fluencia y la deformación unitaria con respecto al porcentaje de material reciclado fundido y la dirección paralelo o perpendicular, se realiza un diagrama de dispersión X-Y, donde, para el eje X los valores correspondientes a la deformación unitaria y para el eje Y los valores correspondientes al esfuerzo en el límite de fluencia, como se ve en la figura 47.



**Figura 48.** Comparación del límite de fluencia vs deformación máxima de las distintas fundiciones. De la figura anterior se puede apreciar que los límites de fluencia no se ven afectados con la adhesión de material reciclado a la fundición, es decir, estos valores se mantienen aproximadamente constantes, y se puede notar que con el 30% de material reciclado y dirección perpendicular al molde se obtiene el mayor resultado del límite de fluencia de 57 MPa, sin embargo, las deformaciones si disminuyen gradualmente a medida que aumenta el porcentaje de material reciclado, con esta situación la menor deformación unitaria encontrada es de 0,0025 mm/mm.

**Tabla 49. Porcentaje de diferencia total entre el límite de fluencia y el de menor valor.**

Resultado de menor valor		Mejor resultado			Diferencia [%]
Dirección	$\sigma_Y$ [MPa]	Dirección	$\sigma_Y$ [MPa]		
Perpendicular 30%	57	Paralelo 30%	49	14%	

La tabla 39, muestra las diferencias porcentuales en cuanto al máximo límite de fluencia con relación al de menor resultado.

## CAPÍTULO IV

### 4.-Costo

Las industrias día a día utilizan toneladas de aluminio para la fundición de varias piezas en un amplio mercado que va desde ejes hasta adornos para el hogar por lo cual al reutilizar viruta o piezas de aluminio que ya no se encuentran en uso se vuelve un negocio muy rentable y por otra parte se tiene un menor impacto ambiental al no generar más desechos de metales.

En proyecto técnico realizado se puede ver la factibilidad de usar materiales reciclados para su reutilización con propiedades mecánicas de la nueva aleación adecuadas para usos puntuales las cuales soporten los esfuerzos requeridos con lo cual se visualiza tener un ahorro de materia prima substituida por viruta obteniéndose un ahorro monetario y de impacto ambiental como se mencionó anteriormente.

Los costos de ahorro se aprecian de manera notable al tener fundición en grandes cantidades ya que por kg se tiene un ahorro del 10%, 20%, 30% de materia prima dependiendo la resistencia que se necesite en las diferentes aplicaciones mencionadas en el capítulo anterior y su costo disminuiría 8.66% con 10% de material reciclado, 17.33% con 20 % de material reciclado y 25.99% con 30% de material reciclado; estos valores en un nivel industrial representan ganancia significativas y sustentan el estudio realizado ya que sería pagado en un corto tiempo y sus usos son ilimitados de acuerdo al avance de la tecnología y creación de nuevas piezas y dispositivos con resistencias acordes a las obtenidas en este estudio.

**Tabla 50. Costos por producción de probetas de aluminio 7075-T6 reciclado**

<b>FUNDICIÓN DE PROBETA</b>	<b>VALOR</b>
Mano de obra, molde de arena, horno (fundición de la probeta)	\$60,00
Tanque de gas	\$250,00
Probeta de aluminio bruto	\$50,00
Probeta de aluminio con 10% reciclado en paralelo	\$45,00
Probeta de aluminio con 20% reciclado en paralelo	\$40,00
Probeta de aluminio con 30% reciclado en paralelo	\$35,00
Probeta de aluminio con 10% reciclado en perpendicular	\$45,00
Probeta de aluminio con 20% reciclado en perpendicular	\$40,00
Probeta de aluminio con 30% reciclado en perpendicular	\$35,00
<b>Total,</b>	<b>\$600,00</b>

Tabla de Costos por producción de probetas de aluminio 7075-T6 reciclado, Fuente: Autores.

**Tabla 51. Costo por maquinado de probeta de aluminio 7075-T6 reciclado.**

<b>MAQUINADO DE PROBETA</b>	<b>VALOR</b>
Mano de obra	\$35,00
Maquinado de probetas	\$60,00
Molde de probeta según normas	\$35,00
<b>Total</b>	<b>\$130,00</b>

Tabla de Costo por maquinado de probeta de aluminio 7075-T6 reciclado, Fuente: Autores.

**Tabla 52. Costo del proceso de reciclado material aluminio 7075-T6**

<b>PROCESO DE RECICLADO</b>	<b>VALOR</b>
mano de obra	\$20,00
recolectar la materia prima	\$15,00
separación de la materia prima	\$10,00
<b>Total</b>	<b>\$45,00</b>

Tabla de Costo del proceso de reciclado material aluminio 7075-T6, Fuente: Autores.

Los costos de por kilo de los materiales se indican a continuación:

**Tabla 53. Costos de material en general**

<b>Precios Netos</b>			
<b>Material</b>	<b>Costo / kg</b>	<b>Peso(g)</b>	<b>Valor Total</b>
Aluminio	3,00	1000	3,00
Prodax reciclado	0,40	1000	0,40

**Tabla 54. Costos de ahorro porcentual**

	<b>Ahorro</b>			
	<b>Material</b>	<b>costo / kg</b>	<b>peso(g)</b>	<b>valor total</b>
<b>10%</b>	Aluminio	3,00	900	2,70
	Prodax	0,40	100	0,04
			Total	2,74
<b>20%</b>	Aluminio	3,00	800	2,40
	Prodax	0,40	200	0,08
			Total	2,48

	Material	costo / kg	peso(g)	valor total
30%	Aluminio	3,00	700	2,10
	Prodax	0,40	300	0,12
			Total	2,24

## CONCLUSIONES

- Los límites de fluencia no se ven afectados con la adhesión de material reciclado a la fundición, es decir, estos valores se mantienen aproximadamente constantes, y se puede notar en la figura 47 que con el 30% de material reciclado y dirección perpendicular al molde se obtiene el mayor resultado del límite de fluencia de 57 MPa.
- Con fundición en forma paralelo, la mayor medida de esfuerzo se obtiene al 10% con fundición y la mayor deformación al 0%.
- Con fundición en forma perpendicular, la mayor medida de esfuerzo se obtiene al 30% con fundición y la mayor deformación al 10%.
- Este trabajo permitió aplicar los conocimientos adquiridos sobre procesos de fabricación. El desarrollo fue la elaboración de probetas con variación del porcentaje 10-20-30% de aluminio 7075 reciclado para ello se aplica un proceso de fundición y otro de maquinado. Fue necesario someter las probetas a tracción utilizando la maquina universal de ensayos para evaluar las propiedades mecánicas, entre otros. Además, el proyecto permite el desarrollo de habilidades en la aplicación e implementación de las técnicas de manufactura, por lo que se concluye que fue una experiencia enriquecedora con la teoría en la práctica.
- Se puede determinar que la curva no varía en su forma inicial, es decir, sus propiedades iniciales son similares, sin embargo, la resistencia máxima en paralelo es superior con un valor promedio de 133,2 MPa y la resistencia máxima en perpendicular con un valor promedio es de 121,4 MPa.
- El módulo de elasticidad presenta variaciones significativas en cuanto a la adhesión de material reciclado, sobre todo, con el 30% de material reciclado y

dirección paralela, donde se encuentra el menor valor con 59 GPa. El mayor resultado se encuentra con el material base en paralelo con un valor de 83,4 GPa.

- El resultado con mayor esfuerzo a la rotura  $\sigma_{\max}$  133 MPa y la mayor deformación unitaria de  $\delta$  0,0074 mm/mm pertenece al material base con dirección paralelo y el menor resultado de esfuerzo a la rotura de  $\sigma_{\max}$  92,9 MPa y deformación  $\delta$  0,0025 mm/mm pertenece a paralelo con el 30% de material reciclado, se nota análogamente con la figura 46 que la pérdida de estas propiedades es gradual a medida que aumenta el porcentaje de material reciclado.
- La aleación obtenida en el estudio realizado a demostrado tener unas propiedades mecánicas utilizables en el mercado así reutilizando materiales en desuso colocándolos de nuevo en el mercado con gastos menores favoreciendo así la economía de industrias de producción en serie.



## RECOMENDACIONES

- Este estudio determinó que las propiedades mecánicas como esfuerzo a la fluencia y límite elástico no varían con la adhesión de material reciclado de 7075, sin embargo, se recomienda realizar experimentos con la adhesión de mayor porcentaje de material reciclado para observar cómo es su comportamiento con respecto a las propiedades mencionadas.
- El aluminio 7075-T6 posee propiedades deseadas para las aleaciones obtenidas, por ejemplo, poco peso, un amplio rango de resistencia, facilidad de maquinado y es económico, es por ello que se eligió este como material de fundición para el proyecto realizado
- El proceso de fundición se aplica no solo a metales sino a otra diversidad de materiales no ferrosos, como el aluminio y es importante resaltar la importancia que tiene la fundición en paralelo ya que es el proceso con el cual el material pierde la menor cantidad de propiedades mecánicas.
- Los estudios con materiales reciclados son favorables con el medio ambiente, de esta manera, es recomendable aplicar a estos resultados un tratamiento de laminado para mejorar las propiedades de ductilidad ya que esta es la propiedad que más se afecta.
- Realizar estudios con mayor porcentaje de material reciclado para así tener mayor cantidad de datos de la resistencia de las nuevas aleaciones para así poder obtener aplicaciones acordes a su resistencia máxima y apoyar a la reutilización de este material para disminuir la contaminación de estos residuos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. R. S. Serope Kalpakjian, *Manufactura ingeniería y tecnología*, México: Pearson, 2008.
- [2] N. M. P. Alfredo Guemes Gordo, *Ciencia de materiales para ingenieros*, Madrid: Pearson, 2012.
- [3] J. F. Shackelford, *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*, Madrid: Pearson, 2010.
- [4] S. G. L. M. Lopez de La Cale Marcaide, *Mecanizado de alto rendimiento*, Bilbao: Izaro, 2004.
- [5] ASTM, «Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials E8,» *ASTM*, vol. E8, 2015.
- [6] L. N. López de Lacalle Marcaide, J. A. Sánchez Galíndez y A. Lamikiz Menchaca, *Mecanizado de alto rendimiento*, Bilbao: Izaro, 2004.
- [7] Sandvik Coromant, «Sandvik Coromant,» Noviembre 2017. [En línea]. Available: [http://sandvik.ecbook.se/se/es/training\\_handbook/](http://sandvik.ecbook.se/se/es/training_handbook/). [Último acceso: 5 Noviembre 2018].
- [8] Arno, *Arno-Turning Service worldwide*, Germany: Arno, 2016.
- [9] *Manual ZCC-CT, Milling*, Dusseldorf: ZCC Cutting Tools GmbH, 2014.
- [10] EMCO, *Easy Cycle EMCOMAT E-200*, Taxach: Hallein, 2016.
- [11] M. Danford, «Internacional Metalmecánica,» Octubre 2009. [En línea]. Available: <http://www.metalmecanica.com/temas/Material-de-herramientas-alternativo-para-desbastar-piezas-de-trabajo-grandes+7072835>. [Último acceso: 01 08 2016].
- [12] B. Singaravel, D. Prabhu Shankar y L. Prasanna, «Application of MCDM Method for the Selection of Optimum Process Parameters in Turning Process,» *ELSEVIER*, nº 5, pp. 13464-13471, 2017.

### 3 Anexos

#### Anexo A. Ficha técnica del material.

**R. ANDRADE**  
*Desde 1940*

FICHA TÉCNICA  
**Barra Aluminio 7075 T6**  
**Redonda**

 [www.randrade.com](http://www.randrade.com) - TLF. 986 600 286

#### ALUMINIO ALEACIÓN ZINC 7075

##### Productos

Chapas - Placas - Barras

##### Aplicaciones y usos típicos

Se trata de la aleación de características más elevadas dentro de los aluminios. El desarrollo de esta aleación ha hecho posible su utilización en campos hasta ahora reservados a los aceros.

El aluminio aleación zinc 7075, se aplica en armamento, industria del automóvil, tomillería, bastones de esquí, cañas de pesca, flechas, moldes de soplado, piezas estampadas para alpinismo, etc.

##### Tratamientos Térmicos

Puesto en solución: 465 ° C + - 5° C.  
Temple en agua fría (40° C máx)  
Maduración artificial: Estado T6, de 12 a 16 horas a 135° C + - 3 ° C.  
Recocido: 30 min. a 2 horas a 375° C -410° C seguido de enfriamiento lento.  
Forja 400° a 450° C. Recomendado 430°C.

##### Aptitudes tecnológicas

**MB:** muy buena  
**B:** buena  
**R:** regular  
**M:** mala, evitar

##### Soldadura

- A la llama .....(B)  
- Al Arco bajo gas argón.....(M)  
- Por resistencia eléctrica.....(B)  
- Braseado .....(R)

##### Mecanización:

-Fragmentación de la viruta..En estado 0: (B) En estado T5: (B)  
-Brillo de superficie.....En estado 0: (B) En estado T5: (B)

##### Comportamiento Natural

-En ambiente rural.....(R)  
-En ambiente industrial.....(R)  
-En ambiente marino.....(M)  
-En agua de mar .....(M)

##### Embutición:

-Por expansión ..... En estado 0: (M)  
-Embutición profunda.....En estado 0: (M)

##### Anodizado

-De protección.....(B)  
-Decorativo .....(R)  
-Anodizado duro .....(MB)

##### Reculado

-En estado: .....(-)  
-En estado: .....(-)

Aceros laminados, Calibrados y Especiales, Hierro fundido, Acero inoxidable, Aluminio, Latón, Bronce, Cobre, Plásticos, Estaños aleados Resinas, Espumas, Tomillería, Malticaría, Utilaje, Soldadura, Peñlería de aluminio y Complementos Industriales.

#### Composición Química

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr + Ti	Otros	Al
Min. Max	0,40	0,50	1,20 2,00	0,30	2´10 2´90	0,18 0,28	5,10 6,10	0,20	0,25	0,15	Resto

#### Equivalencias Internacionales

USA	ESPAÑA	FRANCIA	ALEMANIA	G.B.	SUECIA	SUIZA	CANADA	ITALIA
A.A.	U.N.E.	AFNOR	DIN(1712-1725)	B.S.	S.I.S.	VSM	ALCAN	UNI
7075	L-3710 38.371	A-25 GU	AlZnMgCu1.5 3.4365	L160	-	Perenal	75 S	3735

#### Propiedades Mecánicas

ESTADO	Carga de rotura Rm N/mm2	Límite elástico Rp 0.2 N/mm2	Alargamiento 5,65 V So	Resistencia de la Cizalladura N/mm2	Dureza Brinell(HB)	Vickers
0	280	150	10	-	-	-
T6	540	480	11	330	145	157

#### Propiedades Físicas

Módulo elástico N/mm2	Peso específico gms/cm3	Temperatura de fusión °C	Coefficiente de dilatac. lineal (20°-100°) 10- 6/°C	Conductividad térmica w/m °C	Resistencia eléctrica Micro Ohm cm.	Conduct. eléctrica % IACS	Potencial de disolución V.
72.000	2,80	475-630	23´5	130	5´2	34	0´81

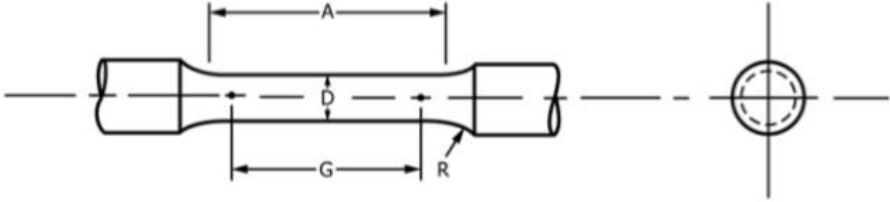
#### Radio De Plegado

Estado	Coef	0´4-0´8 m/m	0´8-1´6 m/m	1´6- 3´2 m/m	3´2-4´8 m/m	4´8-6 m/m	6-10 m/m	10-12 m/m
0	K	0	1	1	1´5	2´5	3´5	-
T6	K	4´5	5´5	6´5	7	8	-	-
-	K	-	-	-	-	-	-	-

#### Chapas y Placas Normalizadas

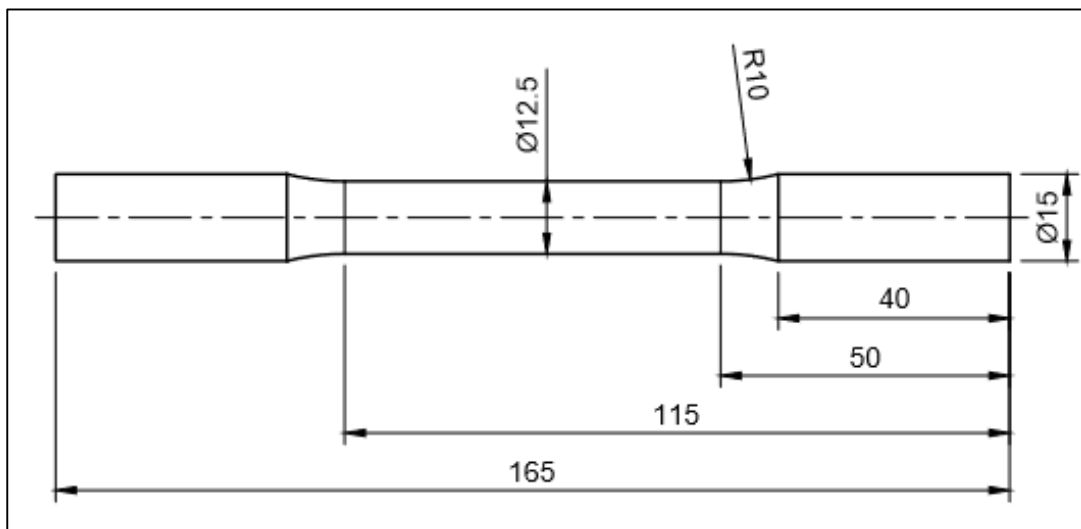
Medidas m/m	Espesor m/m	Espesor m/m	Medidas m/m
1	1250 x 2500	35	1500 x 3000
1´5	1250 x 2500	40	1500 x 3000
2	1250 x 2500	45	1500 x 3000
2	1500 x 3000	50	1500 x 3000
2´5	1250 x 2500	60	1500 x 3000
3	1500 x 3000	70	1500 x 3000
4	1250 x 2500	80	1500 x 3000
4	1500 x 3000	90	1500 x 3000
5	1500 x 3000	100	1500 x 3000
6	1500 x 3000	110	1500 x 3000
8	1500 x 3000	120	1500 x 3000
10	1500 x 3000	130	1500 x 3000
12	1500 x 3000	140	1500 x 3000
15	1500 x 3000	150	1500 x 3000
20	1500 x 3000	180	1500 x 3000
25	1500 x 3000	200	1500 x 3000
30	1500 x 3000		

**Anexo B. Planos de la probeta.**

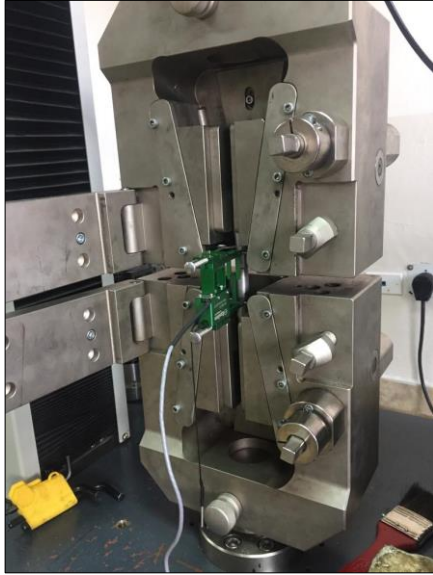


Dimensions, mm [in.]  
For Test Specimens with Gauge Length Four times the Diameter [E8]

	Small-Size Specimens Proportional to Standard			
	Standard Specimen	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4
$G$ —Gauge length	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	24.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]
$D$ —Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]
$R$ —Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]
$A$ —Length of reduced section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]



**Anexo C. Equipos utilizados.**



**Anexo D. Material.**



**Anexo E. Proceso de fundición del material**

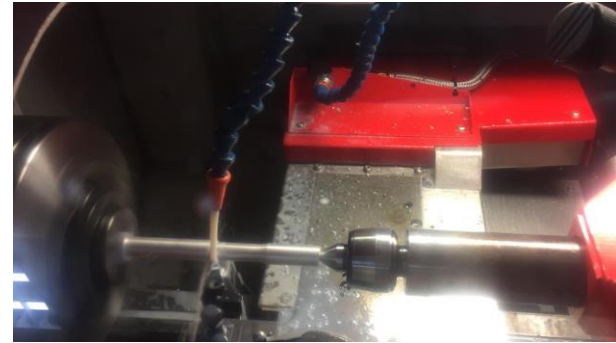






**Anexo F.**

**Maquinado de las probetas**

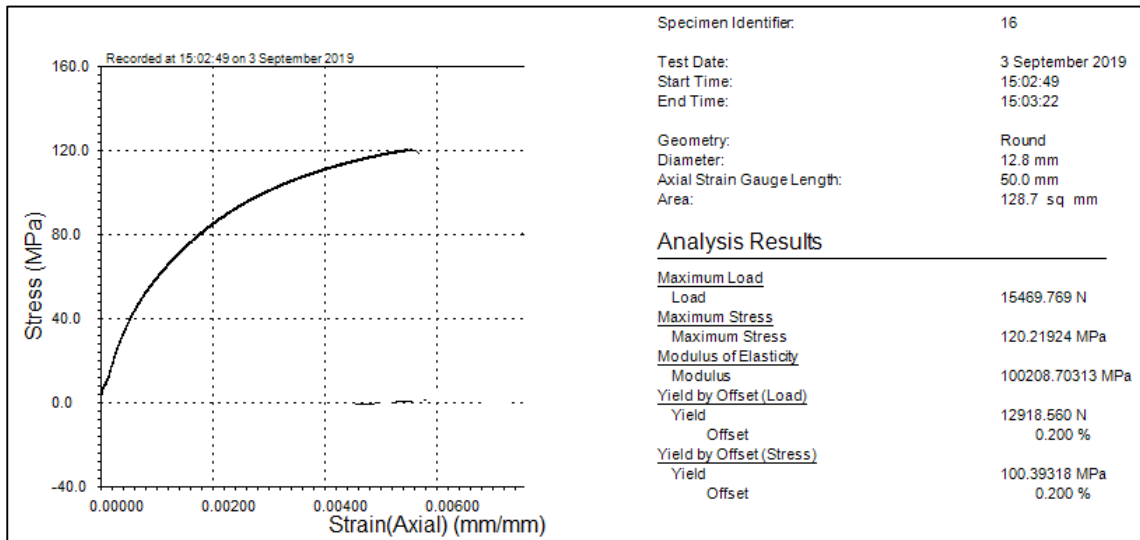


**Anexo G. Prueba de ensayo a tracción**



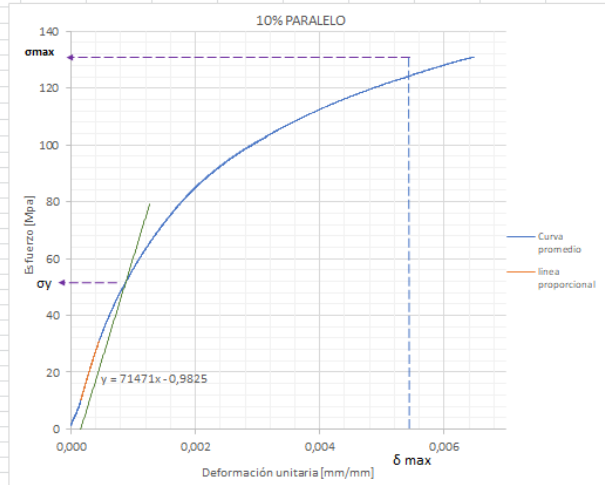


## Anexo H. Resultados reflejados de la maquina Test Resource modelo 315

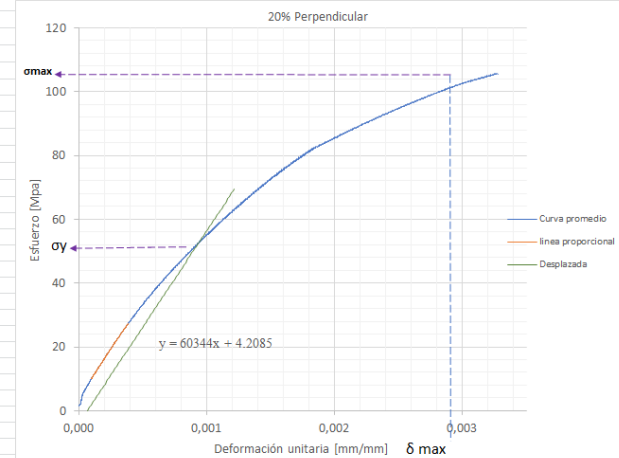


Análisis del Excel

elasticidad			paralela		
E1			E1		
ESF	DEF	E1	67840,5	ESF2	DEF2
1	10,333	0,000162	63752,8	-2,046336934	0,000130
2	10,109	0,000164	61569,1	-1,331626934	0,000140
3	10,539	0,000163	65112,1	-0,616933006	0,000150
4	10,189	0,000163	62327,1	0,097793006	0,000160
5	10,485	0,000165	63586,5	0,812503006	0,000170
6	10,540	0,000165	63922,1	1,527213006	0,000180
7	10,279	0,000166	62074,7	2,241923006	0,000190
8	10,765	0,000166	64732,6	2,956633006	0,000200
9	10,376	0,000167	62131,1	3,671343006	0,000210
10	10,664	0,000166	64123,8	4,386053006	0,000220
11	10,722	0,000168	63931,9	5,100763006	0,000230
12	10,474	0,000168	62191,8	5,815473006	0,000240
13	10,972	0,000168	65147,4	6,530183006	0,000250
14	10,571	0,000169	62504,1	7,244893006	0,000260
15	10,882	0,000170	64079,6	7,959603006	0,000270
16	10,917	0,000171	64020,6	8,674313006	0,000280
17	10,661	0,000171	62257,8	9,389023006	0,000290
18	11,159	0,000171	65166,7	10,10373301	0,000300
19	10,765	0,000173	62354,3	10,81844301	0,000310
20	11,065	0,000172	64352,6	11,53315301	0,000320
21	11,108	0,000173	64077,7	12,24786301	0,000330
22	10,859	0,000174	62389,7	12,96257301	0,000340
23	11,337	0,000173	65667,7	13,67728301	0,000350
24	10,944	0,000175	62623,8	14,39199301	0,000360
25	11,260	0,000175	64171,4	15,10670301	0,000370
26	11,303	0,000175	64679,1	15,82141301	0,000380
27	11,050	0,000177	62475,3	16,53612301	0,000390
28	11,528	0,000177	65176,0	17,25083301	0,000400
29	11,147	0,000178	62771,3	17,96554301	0,000410
30	11,442	0,000178	64343,6	18,68025301	0,000420
31	11,493	0,000178	64466,0	19,39496301	0,000430
32	11,240	0,000180	62554,6	20,10967301	0,000440
33	11,722	0,000180	65235,3	20,82438301	0,000450
34	11,329	0,000180	62800,9	21,53909301	0,000460



elasticidad			paralela		
E1			E1		
ESF	DEF	E1	80770,6	ESF2	DEF2
1	8,184	0,000071	114996,8	-0,022216315	0,000066
2	7,986	0,000072	111108,5	0,581223685	0,000076
3	8,200	0,000072	114089,9	1,184663685	0,000086
4	8,185	0,000071	115003,6	1,788103685	0,000096
5	8,129	0,000073	112000,2	2,391543685	0,000106
6	8,384	0,000074	113310,0	2,994983685	0,000116
7	8,169	0,000075	108345,0	3,598423685	0,000126
8	8,380	0,000075	111138,1	4,201863685	0,000136
9	8,372	0,000074	113153,1	4,805303685	0,000146
10	8,312	0,000076	109224,3	5,408743685	0,000156
11	8,551	0,000076	112359,4	6,012183685	0,000166
12	8,348	0,000075	110723,6	6,615623685	0,000176
13	8,559	0,000077	111431,4	7,219063685	0,000186
14	8,543	0,000078	110219,2	7,822503685	0,000196
15	8,480	0,000078	108410,6	8,425943685	0,000206
16	8,730	0,000080	109640,9	9,029383685	0,000216
17	8,532	0,000080	106205,6	9,632823685	0,000226
18	8,722	0,000079	110515,8	10,23626369	0,000236
19	8,739	0,000080	108781,7	10,83970369	0,000246
20	8,659	0,000080	108742,5	11,44314369	0,000256
21	8,921	0,000081	110091,7	12,04658369	0,000266
22	8,699	0,000080	108289,3	12,65002369	0,000276
23	8,929	0,000083	107387,7	13,25346369	0,000286
24	8,918	0,000083	107251,1	13,85690369	0,000296
25	8,842	0,000082	107247,2	14,46034369	0,000306
26	9,069	0,000084	108150,4	15,06378369	0,000316
27	8,894	0,000085	105182,4	15,66722369	0,000326
28	9,101	0,000085	107624,0	16,27066369	0,000336
29	9,101	0,000086	105865,2	16,87410369	0,000346



elasticidad			paralela		
E1			E1		
ESF	DEF	E1	59043,6	ESF2	DEF2
1	9,012	0,000178	50748,9	-9,240955247	0,000051
2	9,328	0,000178	52531,2	-8,536975247	0,000061
3	9,383	0,000179	52423,0	-7,832995247	0,000071
4	9,123	0,000180	50771,6	-7,129015247	0,000081
5	9,634	0,000181	53195,5	-6,425035247	0,000091
6	9,190	0,000181	50746,7	-5,721055247	0,000101
7	9,514	0,000183	52126,8	-5,017075247	0,000111
8	9,555	0,000183	52152,3	-4,313095247	0,000121
9	9,321	0,000183	50877,3	-3,609115247	0,000131
10	9,825	0,000185	53219,0	-2,905135247	0,000141
11	9,375	0,000185	50781,9	-2,201155247	0,000151
12	9,692	0,000185	52296,7	-1,497175247	0,000161
13	9,740	0,000186	52357,7	-0,793195247	0,000171
14	9,500	0,000187	50873,9	-0,089215247	0,000181
15	9,984	0,000187	53265,8	0,614764753	0,000191
16	9,587	0,000189	50765,6	1,318744753	0,000201
17	9,884	0,000190	52142,5	2,022724753	0,000211
18	9,932	0,000190	52202,1	2,726704753	0,000221
19	9,692	0,000190	50939,8	3,430684753	0,000231
20	10,163	0,000189	53814,2	4,134664753	0,000241
21	9,772	0,000193	50613,1	4,838644753	0,000251
22	10,069	0,000192	52533,1	5,542624753	0,000261
23	10,117	0,000192	52391,2	6,246604753	0,000271
24	9,857	0,000194	50683,2	6,950584753	0,000281
25	10,341	0,000193	53560,9	7,654564753	0,000291
26	9,957	0,000195	51013,8	8,358544753	0,000301
27	10,241	0,000196	52277,5	9,062524753	0,000311
28	10,302	0,000197	52215,0	9,766504753	0,000321
29	10,049	0,000197	50930,6	10,470484753	0,000331
30	10,520	0,000197	53318,0	11,174464753	0,000341
31	10,149	0,000197	51439,1	11,878444753	0,000351

